

Integmeca09

Volet « Intégrité des puits »

Rapport final

BRGM/RP-57966-FR
2010

A. Fabbri, S. Sy, N. Jacquemet, D. Seyedi, L.-H. Garaffa

Vérificateur :

Nom : Jean-François Vernoux

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Hormoz Modaressi

Date :

Signature :

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

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

Mots clés : CO2, intégrité des puits, base de données, classification, analyse de risque, carte de risque, évènement de fuite.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Fabbri A., Sy S., Jacquemet N., Seyedi D., Garaffa L.-H. (2010) – Integmecca09 – Volet « Intégrité des puits » -. Rapport final. BRGM/RP-57966-FR, 70 p., 11 ill., 5 tabl.

Synthèse

Le travail présenté dans ce rapport est réalisé dans le cadre du projet de recherche Intégrité Géomécanique 2009 (INTEGMECA09) dont le but est de développer des méthodologies et des outils nécessaires pour évaluer des scénarios risques géomécaniques du stockage géologique du CO₂.

Dans ce cadre général, nous nous intéressons ici à la problématique des fuites par puits abandonnés et, plus particulièrement, à la construction d'une classification des puits, en fonction de leur risque de fuite. Suite à une revue bibliographique, l'adaptation au contexte Français de la classification canadienne développée par Watson et Bachu en 2007, permettant de classer les puits à hydrocarbures abandonnés selon leur risque de fuite de gaz, est apparu comme l'option optimale.

Ce travail d'adaptation nous a conduit à considérer comme critères de la classification : le type de puits (avec/sans cuvelage interceptant l'aquifère cible du stockage), la date d'abandon (avant/après la réglementation française de 2000), la cimentation (atteignant ou non la surface), la déviation, et la date du forage (avant/après la réglementation française de 1980), auxquels, nous avons proposé d'ajouter, afin de prendre en compte les éventuels modifications de l'intégrité du puits dans le temps, des critères liés à l'environnement (composition chimique de fluide saturant initialement l'aquifère, type de roche intersectée par le puits, température et pression *in-situ*), dont l'impact et les seuils restent encore à estimer.

L'étape suivante a été d'évaluer l'applicabilité de cette classification à des puits à hydrocarbures abandonnés du bassin de Paris. Pour cette évaluation, nous avons utilisés la base de données réalisée dans le cadre d'une convention liant le BRGM et l'agence de l'eau Seine-Normandie, constituée de 3482 forages dont 2590 forages pétroliers, 119 forages géothermiques, 435 forages de stockage de gaz et 338 forages d'eau.

Afin d'étudier l'impact du manque d'information sur la classe de risque associée au puits, nous avons considérés différents cas, allant du plus préjudiciable considérant qu'un critère ne pouvant pas être vérifié en raison d'une carence d'information est défaillant, au cas le plus optimiste pour lequel les critères non vérifiables sont exclus du calcul de risque. Dans le cas le plus préjudiciable, environ 55% des forages atteignant le réservoir ont un risque de fuite en surface très élevé. Dans le cas le plus optimiste, cette valeur passe à environ 25%. La cartographie de ces deux cas extrêmes corrobore cette incertitude en montrant qu'une même zone peut présenter un risque de fuite allant de faible à élevé suivant l'approche retenue. Ces résultats mettent donc en évidence l'importance de la gestion de l'absence d'information sur le résultat obtenu, et l'importance de présenter les incertitudes associées aux résultats (présentation des cartes de risque de fuite par les puits à *maxima* et à *minima* par exemple).

Nous avons enfin tenté de valider cette classification en la confrontant à des évènements de fuite de puits d'hydrocarbure ayant eu lieu en France. Cependant, après avoir contacté une vingtaine de personnes auprès des instances françaises en charge de la gestion du sous-sol, aucune donnée significative de fuites de puits n'a pu être collectée.

Abstract

In the context of geological storage of CO₂ in deep saline aquifers, the wells, in general and abandoned wells more particularly, are usually considered as a potential leakage vector. Indeed, the injected CO₂ will be in contact with abandoned wellbores penetrating the aquifers. The state of the encountered wellbore may vary within a significant range. For instance, depending on the quality of the cementing job, or on the type of abandonment procedure or on the external solicitation that have stressed the well, they can either be considered as a sustainable barrier to CO₂ leakage or as a preferential leakage pathway to upper fresh water aquifers or to the atmosphere.

In order to have a first estimation of the leakage risk associated to a large number of wells, the elaboration of a classification, based on data that can be easily found in official reports, seems to be the best option. Indeed, deterministic approaches will be confronted to the lack of available data and to the lack of knowledge on the physical processes that occur, while the direct estimation of wellbore integrity from in-situ measurement is not possible for a large number of wells. Moreover, a major asset of a classification approach is the possibility to import the results into a GIS based tool that can be used as a decision making help for the site selection management.

In order to build this classification, we have used, as a starting point, the classification developed by Watson and Bachu in 2007 (shallow leakage criteria) and 2008 (deep leakage criteria) for the sedimentary basin of Alberta (T.L. Watson, S. Bachu, SPE 106817, 2007 and T.L. Watson, S. Bachu, SPE 112924, 2008). However, the transposition of this classification to the French context is not direct because number of criteria of the shallow leakage classification depends on Alberta specificities such as regulations, drilling/abandonment procedures ..., while the most of the data needed for the deep leakage classification are hardly available in France.

The first task was to adapt this classification to the French context. The selected criteria are the wellbore type (with/without casing that intercepts the aquifer where the storage will take place), the abandonment date (before/after 2000 which corresponds to a significant improvement in the French wellbore abandonment regulation), the top level of primary cementation, the deviation of the wellbore, and the drilling date (before/after 1980). In addition, new environmental criteria, such as the chemistry of aquifer pore space fluid, the kind of surrounding rock and the in-situ temperature, pressure and stress fields, are proposed in order to estimate the evolution of the leakage risk between the abandonment date and the time where the wellbore will be effectively in contact with the CO₂ plume. The quantification of the impact of these criteria on the risk of wellbore leakage and the set-up of the threshold values are estimated from the simulation of cement chemical alteration and calculation of the mechanical integrity of the casing-cement and cement-rock interfaces under variations of in-situ stress, temperature and pressure fields.

The second step was to evaluate if this classification can be applied in the French context. In other terms, if the chosen criteria can be easily checked from the available data of the wellbore reports. To carry on this work, we have used the data base realised under an agreement between BRGM and the French Water agency (J. F. Vernoux, BRGM Report, 2003). This data base is composed of 2590 oil wells, 119 geothermal wells, 435 natural gas wells and 338 water wells. The criteria were verified through SLQ request, then, the risk category was computed and integrated into a Geographical Information System.

The input data necessary to establish the classification are mostly available. When a data is lacking, we have considered either: 1) a most prejudicial option assuming that the value of the criterion linked to this data is maximum; 2) or less prejudicial option where the criterion is not taken into account in the computation of the risk category. For the most prejudicial case, the results show that 55% of the wellbores that reached the selected deep saline aquifer are in the worst risk category. This high risk level can be explained by the fact that 56.5% of the selected wellbore have a casing that intercepts the aquifer, 84% are cemented to the ground level and 95% were abandoned before 2000. On the contrary, if we consider the less prejudicial case, only 25% of the studied wellbore are in the worst risk category. This emphasizes that the management of the lack of data is of primary importance in this kind of study. Thus, without any additional information, the evaluation of the CO₂ leakage risk along the abandoned wells should at least exhibit the two extreme values that respectively correspond to the less and the more prejudicial options.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Etat des lieux sur le risque de fuite par les puits abandonnés	13
2.1. PRESENTATION DES PUITES	13
2.1.1 L'architecture d'un puits.....	13
2.1.2 Les matériaux de puits	13
2.2. ETAPES DE REALISATION ET DE FERMETURE D'UN PUITES	16
2.2.1 Forage et complétion de puits	16
2.2.2 Abandon	18
2.3. MECANISMES DE FUITES DE FLUIDES AU TRAVERS DE PUITES ABANDONNES.....	19
2.3.1 Fuite par annulaire.....	20
2.3.2 Fuite par le bouchon.....	21
2.4. MOYENS DE CONTROLE DE L'ETANCHEITE D'UN PUITES.....	22
2.4.1 Les mesures directes	22
2.4.2 Les mesures indirectes.....	25
2.4.3 Conclusion.....	26
2.5. INDICATEURS « THEORIQUES » DE FUIITE	27
2.5.1 Indicateurs de migration de gaz	27
2.5.2 Approche statistique : classification des puits	29
2.5.3 Approche déterministe : analyse quantitative du risque de fuite	31
2.6. CONCLUSION	32
3. Adaptation et applicabilité de la classification Watson et Bachu au contexte français	35
3.1. ADAPTATION DE LA CLASSIFICATION WATSON ET BACHU AUX DONNEES DISPONIBLES EN FRANCE	35
3.2. LA BASE DE DONNEES "FORAGES PROFONDS"	37

3.3. VERIFICATION DES CRITERES DANS LA BASE DE DONNEES "FORAGES PROFONDS"	38
3.3.1 Résultats bruts	38
3.3.2 Calcul du risque de fuite en surface	39
3.4. CLASSES DE RISQUE	41
3.5. CONCLUSION	45
4. Tentative de validation de la classification dans le contexte francais.....	47
4.1. SOURCES D'INFORMATIONS DISPONIBLES.....	47
4.1.1 Sources mentionnant des occurrences de fuites d'hydrocarbures	47
4.1.2 Données de puits, le guichet « H »	48
4.2. INFORMATIONS COLLECTEES	49
4.2.1 Données de fuite	49
4.2.2 Données d'architecture de puits.....	50
4.3. CONCLUSION	51
5. Conclusion.....	53
6. Bibliographie	55
Annexe 1 : Processus physico-chimique d'altération des ciments de puits	59
Annexe 2 : Corrosion des aciers	61
Annexe 3 : Résultats du calcul du risque de fuite en surface	63
Annexe 4 : Résultats concernant les classes de risque	71
Annexe 5 : : Liste des personnes contactées et résultats obtenus	77

Liste des illustrations

Figure 1. Coupe technique du puits CH48 (Chailly 48) avant et après abandon. On peut notamment constater ici, contrairement au cas général, une discontinuité de la cimentation primaire, D'après Garaffa et al., (2009).....	14
Figure 2. Schéma de la section transversale du puits CH48 (voir Figure 1 pour la localisation dans le puits).....	15
Figure 3: Configuration d'un puits en trou ouvert (non cuvelé) et en trou cuvelé. D'après (Perrin, 2000).	17
Figure 4. Scénarii de perte d'intégrité (D'après Gasda et al.,2004 modifié)	19
<i>Figure 5:Chemins de migration dans un puits, détectés par le SCFV et le GM (Watson et Bachu, 2008).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 6. Evolution du risque de migration de gaz lors de l'hydratation du coulis de ciment. Adapté de Khodadadi, (2008)</i>	<i>28</i>
Figure 7. Lithostratigraphie simplifiée utilisée dans le cadre de l'étude. D'après (Szymanski et al. 2007).....	36
Figure 8. Comparaison de l'évolution du risque sous différente prise en compte de l'absence d'informations. L'abscisse correspond au nombre de puits pris en compte et l'ordonnée au risque cumulé.....	41
Figure 9. Arbre de risque utilisé dans cette étude afin de batir les classes de risque.....	43
Figure 10. Comparaison des résultats des deux approches sur les classes de risque.....	44
Figure 11. Cartographie des resultats de l'analyse de risque de fuite par les puits abandonnés.	45

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristique mécanique d'aciers de cuvelage en fonction de leur classe. D'après (Guo, 2007).....	15
Tableau 2. Disponibilité des critères sur les 216 puits abandonnés et pouvant intercepter le Dogger.....	39
<i>Tableau 3 : Coefficients attribués aux critères pour le calcul du risque avec prise en compte de l'absence d'informations. D'après Watson et Bachu (2008).....</i>	<i>40</i>
Tableau 4. Pourcentage de forages de chaque classe de risque dans les deux approches.....	42
Tableau 5: Disponibilité des données de puits	50

1. Introduction

Pour justifier les coûts mis en jeu lors du processus de piégeage du CO₂ et pour atteindre les objectifs de sécurité et de durabilité du stockage, il est nécessaire de prévenir les risques de remontés du CO₂ vers l'atmosphère ou vers d'autres formations géologiques et en particulier les aquifères d'eau potable). La description et la modélisation des différents scénarios de risques est réalisée dans le rapport BRGM/RP-56592-FR (Bouc *et al.*, 2008).

Nous nous intéressons ici au cas du risque de fuite par les puits abandonnés. Les différentes études d'impacts ayant été réalisées dans le cadre de ce scénario (citons par exemple Gasda, *et al.*, (2004), Viswanathan *et al* (2008), Nordbotten *et al.*, (2009), et Wertz *et al.*, (2009) au BRGM) ont mis en évidence que les deux paramètres clés sont :

- Les caractéristiques hydrauliques apparentes des puits (i.e. perméabilité et porosité équivalentes de l'interface entre le puits et la roche de couverture), pilotant le débit de fuite, ainsi que, indirectement, la nature de cette fuite (Geyser, fuite diffuse, ...),
- La distance entre le/les puits susceptibles de fuir et le point d'injection de CO₂ déterminant la pression de la phase fluide en bas du puits.

En fait, le problème majeur de ce type d'approche déterministe réside dans le manque d'informations sur les paramètres hydrauliques initiaux des puits et l'impossibilité technique et économique de les mesurer « *après coup* » sur l'ensemble des puits abandonnés susceptibles d'entrer en contact avec le panache de CO₂.

Pour pallier ce problème, une option pourrait être de faire une présélection des puits qui sont susceptible de présenter, *a priori*, le plus grand risque de fuite. Cette présélection pourrait se baser sur une classification des puits en fonction de leur description, de leur type, de leurs caractéristiques, données et diagraphies reportées dans les rapports officiels (rapports de fin de sondages, rapports d'abandons, rapport d'incidents, ...).

Ainsi, le but final de l'étude proposée est de développer une méthodologie de classification des puits, adaptée au contexte du stockage géologique du CO₂ en France, permettant de construire une carte des risques de fuite par les puits.

Le point de départ du travail achevé en 2009 a été de réaliser une revue bibliographique des différents moyens, directs ou indirects, permettant de quantifier l'étanchéité d'un puits.

A la suite de cette première partie bibliographique, une méthodologie, permettant de classer les puits à hydrocarbures abandonnés selon leur risque de fuite de gaz est

proposés. Cette classification donne donc les moyens, dans un contexte de stockage géologique de CO₂, d'estimer les risques de remontée de CO₂, piégé en profondeur, au travers de puits abandonnés.

La suite du rapport sera consacrée à évaluer cette classification de deux manières :

- D'une part, il s'agit d'évaluer l'applicabilité de cette classification aux puits abandonnés disponibles dans la base de données mise au point par Vernoux *et al.*, (2003) dans le cadre d'une convention liant le BRGM et l'agence de l'eau Seine-Normandie.
- D'autre part il s'agit d'évaluer sa pertinence, en vérifiant si les critères retenus peuvent expliquer les occurrences de fuite en France.

2. Etat des lieux sur le risque de fuite par les puits abandonnés

2.1. PRESENTATION DES PUIITS

2.1.1 L'architecture d'un puits

Il est délicat de définir « l'architecture type » d'un puits puisque cette dernière est fonction de son but (exploration, confirmation, développement), de son environnement, de l'outil de forage utilisé, du réservoir visé, du type de production et de la technique de complétion utilisée (tubé ou non-tubé) (Perrin, 2000). Généralement, les puits sont des ouvrages composés d'un ou de plusieurs cuvelages en acier visant notamment à stabiliser les parois du puits et de ciment.

Dans le cas d'un puits abandonné, il faut distinguer deux types de ciments à la fois en termes d'âge et de composition (Figure 1, Figure 2) :

- un ciment primaire (cimentation primaire), mis en place lors ou peu de temps après le forage dans l'annulaire du puits ;
- un ciment secondaire qui compose les bouchons (placés dans la lumière du puits) lors de la fermeture du puits.

2.1.2 Les matériaux de puits

Le ciment

Les ciments sont issus du durcissement d'un laitier (mélange ciment-eau-additifs minéraux-adjuvants) dans les conditions de pression et température de mise en place de ce dernier. Les cimentations de puits sont réalisées avec des ciments standardisés par l'« *American Petroleum Institute* » (API) et définis par la norme ISO 10426-1 (2005). Ils sont obtenus par broyage de clinker de type Portland. On distingue 8 classes de ciments (de A à H). Le choix d'une classe de ciment se fait en fonction des conditions de pression, température et teneur en sulfate du milieu. Ils sont généralement de classe G et H de type *Ordinary*, *Moderate Sulfate Resistant* ou *High Sulfate Resistant* selon leur composition minéralogique et leur résistance souhaitée à l'attaque sulfatique. Des additifs minéraux inertes ou hydrauliquement réactifs peuvent être ajoutés au mélange ciment-eau. Les additifs hydrauliquement réactifs ont l'intérêt de réagir chimiquement avec l'eau pour former des minéraux qui intègrent la matrice du ciment. De nombreux adjuvants tels que des retardateurs, dispersants, modificateurs de propriétés physiques peuvent par ailleurs être ajoutés au coulis. A

l'issue du durcissement in-situ du laitier, la minéralogie du ciment est composée essentiellement de Silicates de Calcium Hydraté (CSH) et de portlandite (CH).

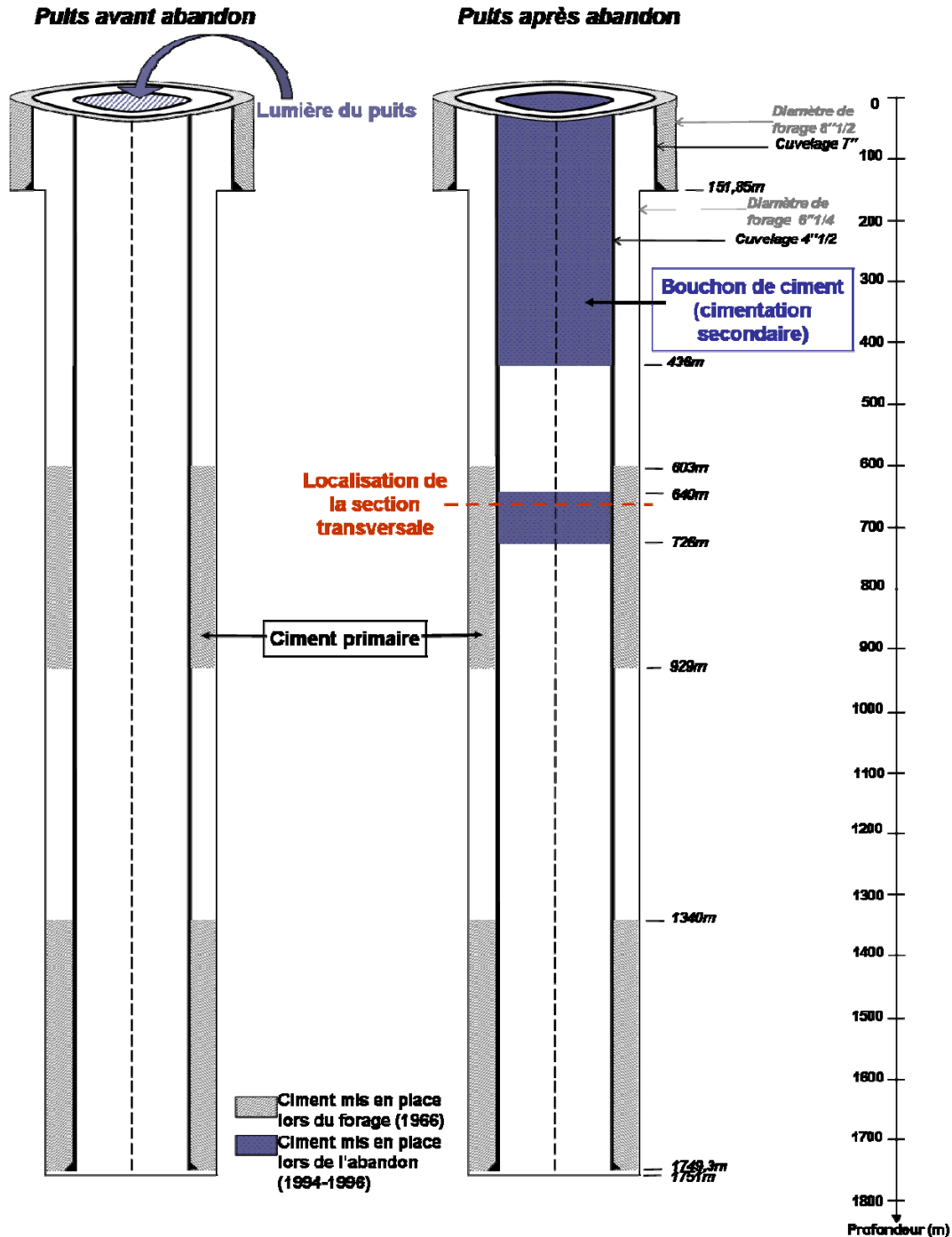


Figure 1. Coupe technique du puits CH48 (Chailly 48) avant et après abandon. On peut notamment constater ici, contrairement au cas général, une discontinuité de la cimentation primaire, D'après Garaffa et al., (2009)

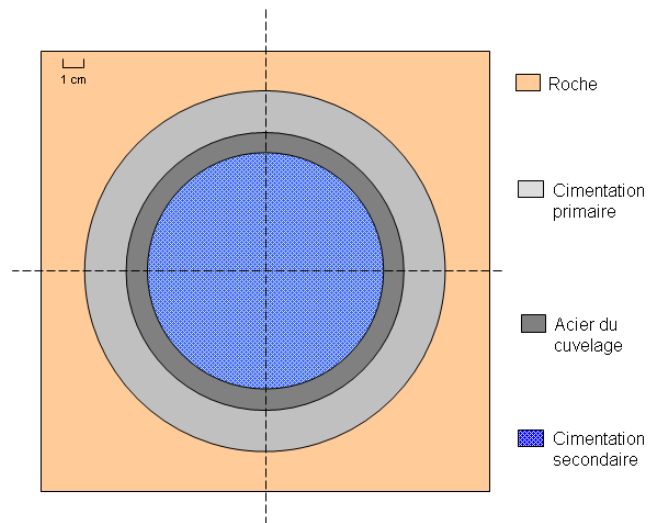


Figure 2. Schéma de la section transversale du puits CH48 (voir Figure 1 pour la localisation dans le puits).

Le cuvelage

Le cuvelage est communément fait d'acier non allié (c'est-à-dire composé de fer et de carbone uniquement), mais peut également, dans des cas spécifiques, être réalisé en acier inoxydable (contenant du nickel et du chrome), aluminium, titane, fibre de verre, ou autres matériaux (Schlumberger, 2009). Les différences entre les aciers sont principalement dues au traitement thermique appliqué au matériau afin d'obtenir les résistances mécaniques souhaitées. La classification des cuvelages consiste en une lettre, faisant indirectement référence à la résistance en traction, et un chiffre correspondant à la limite élastique minimale en kpsi (Schlumberger, 2009, Guo *et al*, 2007) (cf. Tableau 1).

Classe du cuvelage	Limite élastique (MPa) / (x 1000 psi)		Résistance minimale en traction (MPa)/(x 1000 psi)
	Minimale	Maximale	
H-40	276 / 40	551 / 80	413 / 60
J-55	379 / 55	551 / 80	517 / 75
C-75	517 / 75	620 / 90	655 / 95
L-80	551 / 80	655 / 95	655 / 95
N-80	551 / 80	758 / 110	689 / 100
C-90	620 / 90	724 / 105	689 / 100
P-105	724 / 105	931 / 135	827 / 120

Tableau 1. Caractéristique mécanique d'aciers de cuvelage en fonction de leur classe. D'après (Guo, 2007)

Le dimensionnement d'un cuvelage (épaisseur, poids, classe) est établi en fonction de la pression d'éclatement (« burst pressure » = pression maximale admissible au sein du cuvelage) et de la pression d'écrasement (« collapse pressure » = différentiel admissible entre la pression à l'intérieur et à l'extérieur du cuvelage), pondérées par des coefficients de sécurité dépendants des pressions d'injection, de production, de la profondeur du puits et des conditions dans le réservoir. Pour les puits d'une profondeur inférieure à 3000 m, des cuvelages en acier de classe J-55 et K-55 sont traditionnellement utilisés. Dans le cas des puits susceptibles d'être en contact avec des fluides agressifs (H₂S, CO₂, ...) des alliages résistants à la corrosion (CRA = « Corrosion Resistant Alloys ») peuvent être utilisés (Meyer, 2007). Cependant, une alternative souvent utilisée dans ce contexte est l'utilisation d'acier de limite élastique modérée, reconnus pour être moins sensible aux corrosions fissurantes que les aciers avec de hautes performances mécaniques. Ainsi, si l'acier est susceptible de rencontrer du H₂S, il est possible de ne pas pouvoir utiliser des tubes avec une résistance aussi importante que souhaitée (Schlumberger, 2009, Shryock et Smith, 1981).

2.2. ETAPES DE REALISATION ET DE FERMETURE D'UN PUIITS

2.2.1 Forage et complétion de puits

Le mot complétion signifie achèvement du puits qui vient d'être foré. La complétion est donc le maillon entre le forage proprement dit du puits et l'exploitation de celui-ci. De ce fait la complétion englobe l'ensemble des opérations destinées à la mise en service du puits et, en particulier, à la liaison couche¹-trou, le traitement de la couche, l'équipement du puits, sa mise en production et son évaluation (Perrin, 2000). En ce qui concerne la liaison couche-trou, il existe deux principales configurations (voir *Figure 3*) :

- les complétions en trou ouvert : Le cuvelage s'arrête au toit de la couche réservoir. Ainsi, la production se fait directement en trou ouvert. Cette solution simple ne permet pas de résoudre les problèmes de tenue des parois et de sélectivité du fluide au niveau du réservoir;
- les complétions en trou cuvelé : un cuvelage est mis en place et cimenté au droit de la couche réservoir. Des perforations sont réalisées au droit de la zone que l'on souhaite produire pour rétablir la communication entre le réservoir et le puits. Ces perforations devront traverser le cuvelage et la gaine de ciment avant de pénétrer dans la formation.

¹ Par couche, il faut entendre une zone constituée de roches « réservoirs » contenant des hydrocarbures récupérables. On pourra aussi parler de « zone productrice », « niveau réservoir » ou « niveau producteur. ».

Dans le cadre des forages profonds, la configuration la plus classique est celle d'un puits à trou cuvelé, consistant en une succession de trous concentriques. Suivant la profondeur à atteindre, jusqu'à 5 trous de diamètres de plus en plus petits peuvent être forés. Après qu'une section du puits ait été forée, le tube de forage est retiré du trou et un cuvelage est introduit. Cette opération s'achève avec un trou rempli de fluide de forage. Une fois que le cuvelage est en place, un coulis de ciment est injecté dans la colonne de tubage jusqu'au bas du puits puis remonte au travers de l'annulaire entre le tubage et la paroi du puits. Cette opération s'appelle la cimentation primaire. Notons que le cuvelage ainsi mis en place sert de guide pour le trépan suivant, qui sera à son tour tubé puis cimenté. Souvent le dernier trou est foré en diamètre 8,5" (~21cm), tandis que le premier trou est foré en diamètre 30" (~76 cm) (Pironon et al, 2007).

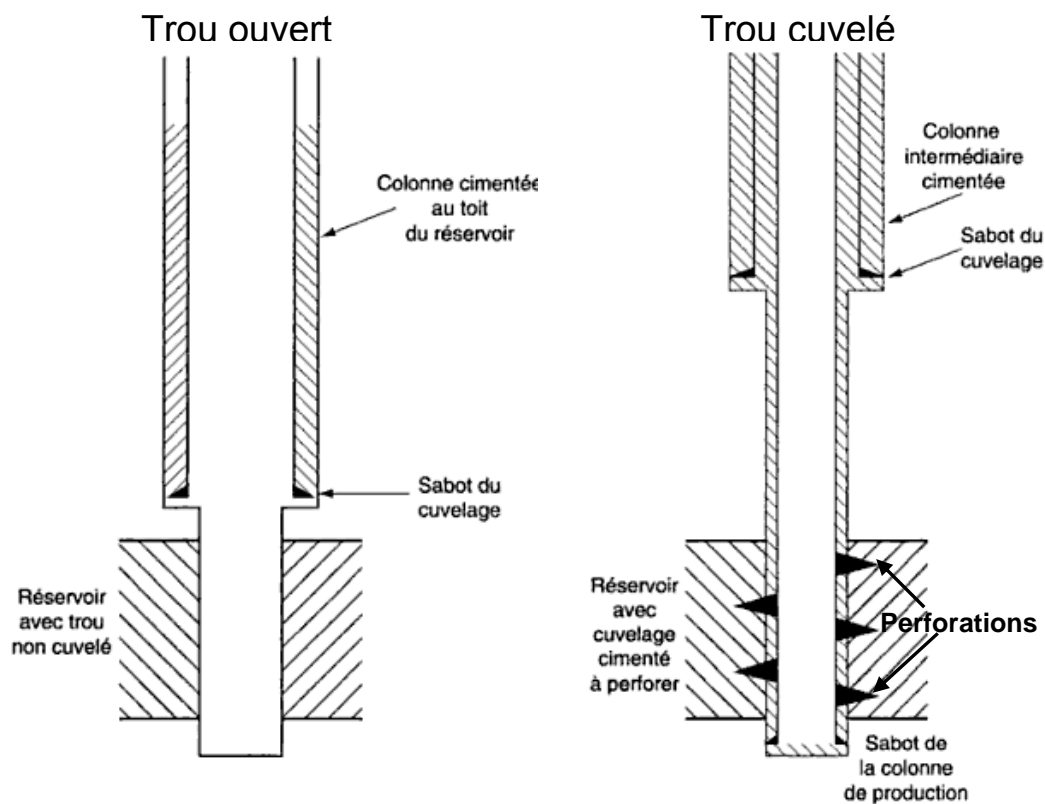


Figure 3: Configuration d'un puits en trou ouvert (non cuvelé) et en trou cuvelé. D'après (Perrin, 2000).

Le but majeur de la cimentation primaire est d'assurer une isolation la plus complète entre les différentes formations géologiques (spécialement entre les aquifères). La gaine en ciment doit de ce fait empêcher toute circulation de fluide (gaz, pétrole, eau, CO₂, ...) (Perrin, 2000). La cimentation primaire doit également assurer la continuité mécanique entre la colonne de tubage et la paroi du puits et protéger le cuvelage des risques des agressions dues aux fluides des roches avoisinantes : par le pH élevé de sa solution interstitielle (environ 13), le ciment a la propriété de passiver le cuvelage en acier et ainsi de le protéger de la corrosion. Afin d'atteindre ce double objectif, le fluide

de forage doit être retiré de l'annulaire (opération de « mud removal ») avant la mise du ciment. La qualité de la cimentation des annulaires peut être contrôlée par des mesures géophysiques (diagraphies) spécifiques (cf. §2.4).

2.2.2 Abandon

Généralités sur les processus d'abandon

Lorsqu'un sondage d'exploration est infructueux ou lorsque la production d'un puits devient trop faible, une opération de colmatage définitif a lieu, le plus souvent par la mise en place de bouchons de ciments dans la lumière du puits. Cette opération est précédée par le retrait des équipements de puits (pakiers, tube de production, pompes de fond de puits, ...) et le nettoyage du puits par circulation de fluide (Fields et Martin, 1997). Comme dans le cas de la cimentation primaire, la vérification du niveau atteint par le toit du ciment, en fonction du volume de ciment injecté, est réalisée.

A minima, trois bouchons en ciment sont mis en place (Fields et Martin, 1997). Le premier, en fond de puits, sert à colmater la zone anciennement productrice. Le second est usuellement à mi-profondeur ou près du sabot d'un tube producteur. Enfin, un bouchon de surface est installé aux alentours de 50-100 m au dessous de la surface. De plus, si le puits a mis à jour des zones aquifères, il faut les isoler par mise en place, à leur niveau, d'un ou plusieurs bouchons de ciment. Pour les forages à terre, il faut ensuite couper la tête du puits et disposer du ciment en surface pour obturer le puits. Pour les forages marins, en fonction de la législation, on peut soit laisser la tête du puits, soit dégager le fond marin de tout obstacle².

Les bouchons sont traditionnellement de 30 à 60 m de long. Leur tenue est testée en pression ou en poids (test en pression ou test de pistonnage par exemple). Ils peuvent être mis en place dans des trous tubés ou non tubés (complétion de puits non-tubé ou retrait du cuvelage avant cimentation) (Benson *et al.*, 2005). Enfin, toutes les portions non cimentées sont remplies par un fluide (usuellement boue) dont la densité permet d'exercer une pression hydrostatique supérieure à la pression de formation. Le but de ce fluide est de prévenir les risques de transferts d'un fluide de formation vers le puits (Fields et Martin, 1997).

Aspect réglementaire de l'abandon

Il apparaît ainsi que la bonne maîtrise des opérations de cimentation est cruciale vis-à-vis de la pérennité d'une procédure d'abandon et donc de la protection de l'environnement. Chaque pays a ainsi développé des réglementations « nationales », qui tendent à être de plus en plus strictes.

² Voir, « Prévention et Maîtrise des Eruption », par la *Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel*, 1979, 173p.

En France, la date référence pour les forages pétroliers est le 22 mars 2000 qui correspond à l'adoption du titre forage du règlement général des industries extractives, qui rend obligatoire des recommandations sur le bouchage des forages (<http://www.industrie.gouv.fr/sdsi/dtss/regl/cdrgie/FO.htm#s4>).

2.3. MECANISMES DE FUITES DE FLUIDES AU TRAVERS DE PUITES ABANDONNES

Les chemins de fuite préférentiels d'un puits abandonné sont l'espace annulaire entre la formation et le cuvelage (si cuvelage il y a) et l'intérieur du cuvelage suite à une rupture d'étanchéité du bouchon (voir notamment Gasda *et al.*, (2004)).

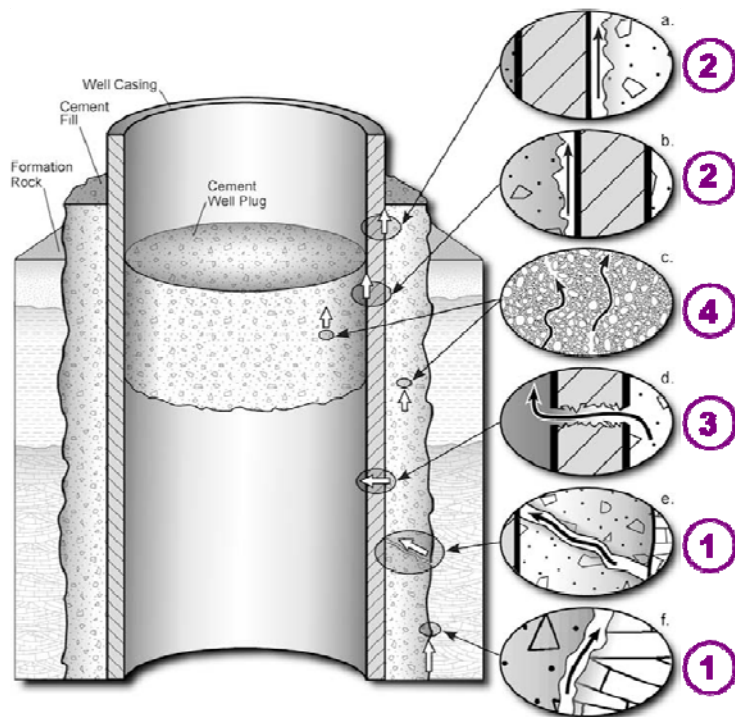


Figure 4. Scénarii de perte d'intégrité (D'après Gasda *et al.*, 2004 modifié)

- 1 : Fuite par annulaire – interface ciment-formation
- 2 : Fuite par annulaire – interface ciment-cuvelage
- 3 : Fuite par annulaire : rupture du cuvelage
- 4 : Fuite par le bouchon

2.3.1 Fuite par annulaire

Les ciments classiquement utilisés dans les forages pétroliers et géothermiques ont une perméabilité inférieure à 0,01 mD (i.e. très faible). Cependant, la présence d'un micro-annulaire continu peut entraîner des modifications significatives. En effet, en supposant un écoulement de Poiseuille dans le micro-annulaire, Economides, (1990) montre que 1,1 μm de micro-annulaire entraîne une perméabilité équivalente³ du ciment de 120 mD (avec un trou de rayon 8''3/4 (12 cm) et rayon externe du cuvelage de 7''7/8 (10 cm)). Bien qu'il soit peu probable qu'un tel micro-annulaire soit continu, ce calcul met en évidence que tout défaut de cimentation ou endommagement de l'interface ciment-cuvelage ou ciment-formation peut avoir des conséquences importantes sur l'étanchéité du puits.

Une mauvaise cimentation primaire est généralement attribuée à:

- un mauvais « mud-removal », pouvant, par exemple, être consécutif à un mauvais centrage du cuvelage) ;
- un mauvais remplissage du ciment suite à un calcul erroné de volume de ciment (problème de densité de laitier, mauvaise connaissance du milieu géologique,...).

En outre, même dans le cas d'une bonne cimentation initiale, les variations de pression et de température auxquelles va être soumis l'annulaire ainsi les agressions chimiques du ciment le composant peuvent engendrer une augmentation de la perméabilité non négligeable, voire produire des ruptures d'interfaces. Ces effets peuvent être visibles dès 50 ans de vie de l'ouvrage.

Cas de l'interface ciment-formation (1 Figure 4)

Même dans le cas d'une bonne cimentation initiale, la rupture de l'interface ciment-roche peut se produire en raison de sollicitations thermomécaniques (variations de pression, température, contraintes *in-situ*) et/ou chimiques (réactions avec H_2S , CO_2 , ...cf. annexes 1 et 2) (Gasda *et al.*, 2008). Suivant le type de sollicitation, l'interface ciment-roche sera soumise à (Orlic, 2008):

- une déformation radiale, causée par le retrait d'hydratation du ciment, les variations pression/température dans le puits, les variations de contraintes et pression *in-situ* (fluage de la formation, mouvement visqueux...) notamment en présence d'halites), la corrosion du ciment ... ;
- une déformation axiale, causée par les variations de pression et de température dans le réservoir ;

³ La perméabilité de la gaine en ciment est la perméabilité équivalente résultant de la perméabilité de la matrice cimentaire et d'un micro-annulaire / ou d'une zone de forte perméabilité

- un cisaillement dû à la propagation de fractures amorcées dans le réservoir ou aux interfaces réservoir/couverture. Phénomène particulièrement important s'il existe une grande différence de dureté entre la couverture et le réservoir.

Cas de l'interface ciment-cuvelage (2 et 3 Figure 4)

Le manque de lien entre le ciment et le cuvelage peut entraîner la formation d'un annulaire et la corrosion du cuvelage, ce dernier n'étant plus passivé par la gaine de ciment (cf. annexe 2). La mise en évidence de la corrélation entre une mauvaise cimentation et la corrosion du cuvelage est notamment rapportée par Watson et Bachu, (2007).

De manière générale, il est observé qu'une bonne cimentation a pour conséquence de limiter les dégradations chimiques des cuvelages, notamment dues à la présence de fluides agressifs (CO_2 , H_2S , ...). La faible perméabilité du ciment, protège en effet le cuvelage qu'il entoure des substances délétères, le pH d'équilibre élevé du fluide en contact avec le ciment, ayant pour conséquence la passivation de l'acier (Chaussadent, 1999). Notons cependant que la carbonatation du ciment induit la réduction du pH de sa solution interstitielle, engendrant une dé-passivation du cuvelage. Ainsi, au temps long en présence de CO_2 , une bonne cimentation pourrait ne plus être suffisante pour prévenir la corrosion du cuvelage. De même, en présence d'ions chlorures, et d' H_2S , le ciment ne constitue qu'une barrière de protection provisoire vis-à-vis de la corrosion du cuvelage.

En plus des phénomènes de ruptures chimiques, une étude conduite par (Peng *et al.*, 2007) dans le réservoir du Gudao a montré que le fluage et la fracturation peuvent être une cause importante d'endommagement du cuvelage. Ce type d'endommagement se produit principalement à la traversée de zones non-consolidées (grès non-consolidés, ...). Dans ce cas, le cuvelage perd en partie son support latéral, ce qui conduit à une redistribution des contraintes et à un risque de fluage, pouvant conduire à une rupture locale du cuvelage.

2.3.2 Fuite par le bouchon

La fuite par le bouchon (4 Figure 4) peut être consécutive à une mauvaise opération de cimentation, généralement décelable lors de la procédure d'abandon, à une rupture suite aux modifications de pression et température (Mainguy *et al.*, 2007) et/ou aux sollicitations chimiques notamment en présence de H_2S (Jacquemet *et al.*, 2008) et/ou CO_2 (Jacquemet *et al.*, 2008 ; Fabbri *et al.*, 2009a,b). Les risques de rupture post-abandon restent globalement les mêmes que pour une rupture de la cimentation primaire (i.e. rupture d'interface ciment-cuvelage ou rupture du bouchon en ciment), à la différence d'une plus grande facilité de contrôle et de mise en œuvre. De plus, la présence de plusieurs bouchons, notamment entre chaque zone aquifère, tend à rendre ce scénario de fuite plus « maîtrisable » que la fuite par l'annulaire.

2.4. MOYENS DE CONTROLE DE L'ETANCHEITE D'UN PUIT

Le premier moyen de contrôle d'une cimentation est la vérification des conditions dans lesquelles elle s'est déroulée. En particulier toute anomalie reportée dans le **RFS** (rapport de fin de sondage) doit faire suspecter la qualité de la cimentation. Cependant, l'absence d'anomalies dans la mise en œuvre de la cimentation n'est pas suffisante pour considérer celle-ci comme bonne.

En raison des différents chemins de fuite au travers d'un puits, il est nécessaire d'examiner l'état de l'acier, du ciment et d'identifier tous les risques d'annulaire et de défauts pouvant exister. Aucune méthode peut à elle seule étudier tous les matériaux et toutes les interfaces. Ainsi, une combinaison de mesures est nécessaire. Nous pouvons distinguer, d'une part, les mesures directes tels l'analyse de fluide et le carottage, et d'autre part, des mesures indirectes provenant des outils de diagraphie embarqués sur le câble de forage, permettant de réaliser des mesures non destructives (Duguid et Tombari, 2007).

2.4.1 Les mesures directes

Mesures de migration de gaz en surface

Dans le cas des puits en production ou en exploitation, de nombreuses méthodes sont mises en œuvre afin de vérifier qu'aucune rupture d'étanchéité a lieu. Communément, on procède à l'inspection des têtes de puits (chaque jour), à une mesure de la pression du fluide dans l'annulaire formé par le tubing et le cuvelage, à une inspection de l'instrumentation (manomètres, thermomètres, etc.) et à une inspection des vannes et des dispositifs de sécurité et de prévention (Pironon *et al.* 2007). L'inspection d'une éventuelle fuite de gaz en surface est également contrôlée avant de débiter la phase d'abandon. L'avantage majeur de ce type de test est la facilité de sa mise en œuvre. Les deux types de fuites de surface susceptibles d'être contrôlées sont (Oil and Gas Commission, 2008 ; Watson et Bachu, 2007):

- les fuites au travers de l'annulaire cimenté entre le cuvelage de surface et le casing intermédiaire (on parle alors de **SCVF** pour « *Surface Casing Vent Flow* ») (voir 1 sur la *Figure 5*). Le gaz remontant au travers du ciment provient d'une formation située au-dessous du sabot du cuvelage le plus extérieur et s'échappe à la surface. La fuite peut être détectée en raison d'un flux de fluide trop important (limite fixée à 300 m³/jour) ou à une surpression en pied du cuvelage de surface trop importante ;
- les fuites au travers d'une zone de test autour du puits (on parle alors de **GM** pour « *Gas Migration* »). Le principe est de forer des trous d'au moins 50 cm de profondeur dans la zone de test et de les équiper de dispositifs permettant de détecter la moindre fuite de gaz combustible. Dans ce cas les fuites peuvent provenir :

- de formations de gaz profondes situées au-dessous du sabot du cuvelage le plus externe (voir 2 sur la *Figure 5*). Cette fuite peut être due à la mauvaise cimentation de l'espace entre le cuvelage extérieur et la roche ou à la fracturation du ciment ou de la roche au niveau du sabot en raison de la surpression ;
- d'accumulations de gaz peu profondes situées au-dessus du sabot du cuvelage externe (voir 3 sur la *Figure 5*), fuyant par l'enveloppe superficielle mal cimentée.

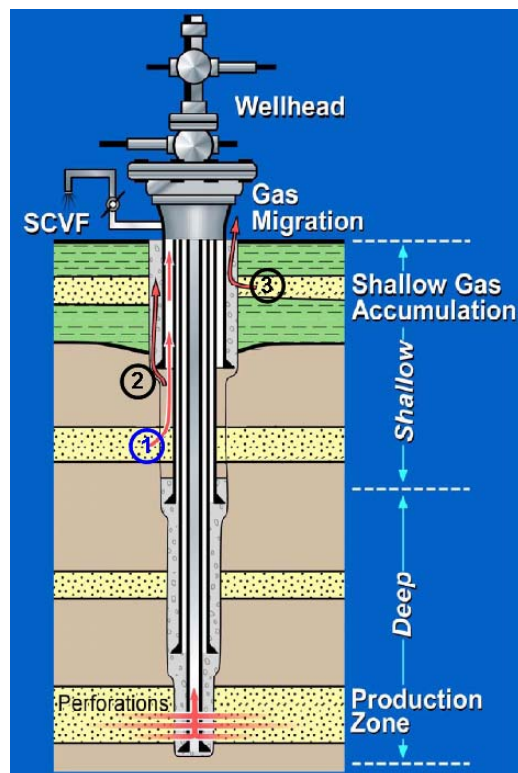


Figure 5: Chemins de migration dans un puits, détectés par le SCFV et le GM (Watson et Bachu, 2008)

En cas de remontée de fluide non désirée (notamment s'il contient du H_2S) un système de prévention de ces écoulements (*packer*) peut être activé et couplé à un système de vannes d'urgence en tête de puits. Des procédures de contrôle (débit de fuite, ...) et de remédiation de la fuite peuvent alors être mises en œuvre.

Notons cependant que ces mesures sont réalisées en surface pendant un laps de temps relativement court. Elles constituent donc un contrôle indispensable pour la sécurité du puits durant les phases d'exploitation mais elles ne sont pas forcément un bon indicateur de la pérennité à long terme des puits. De plus, toutes les fuites ne remontent pas à la surface (fuite vers un stockage secondaire par exemple), et les

micro-fuites, problématique dans le contexte du stockage géologique du CO₂, sont difficilement décelables par ce biais.

Mesure de la perméabilité et analyse des fluides

La mesure de la perméabilité (ou mobilité = perméabilité/viscosité) du ciment et de la formation peut être réalisée sur site en utilisant un dispositif pouvant forer au travers du cuvelage avant de soumettre le matériau ainsi découvert à un pulse de pression (principe du « *pulse test* » développé dans Bredehoeft et Papadopulos, (1980)). Il est également possible de faire un prélèvement fluide pour analyses chimiques (pH, identification du fluide, échantillonnage physique). Cependant ce type de test endommage localement l'interface ciment-formation et ne permet pas d'estimer les faibles perméabilités (ciment, couverture) (Duguid et Tombari, 2007).

Echantillonnage latéral

L'outil utilisé pour ce type d'échantillonnage est capable de traverser le cuvelage, le ciment et la formation, permettant ainsi de récupérer un échantillon composite composé de chacun de ces trois matériaux. Les échantillons ont des dimensions d'environ 2.5 cm de diamètre et quelques centimètres de longueur (Duguid et Tombari, 2007).

Cette technique est encore récente et s'est illustrée par les travaux de Carey et al. (2007) sur un puits de 55 ans d'âge dans le Permian basin du Texas (SACROC Unit). Ce puits a été utilisé pendant 30 ans pour des opérations de récupération assistée par injection de CO₂. Les échantillons récupérés se situent à 3 mètres au-dessus du réservoir dans les shales de la roche couverture ont permis d'observer et de caractériser la carbonatation in-situ de la cimentation annulaire.

Tests de perméabilité équivalente de l'annulaire du puits

La perméabilité équivalente d'un puits⁴ est un paramètre clé pour tout modèle de fuite par puits. Le problème est l'impossibilité de connaître, *a priori*, son ordre de grandeur. La mise au point de tests fiables de perméabilité équivalente est donc un enjeu de première importance. Un exemple de test en pression visant à estimer la perméabilité effective du puits au travers d'une couverture peu perméable située entre deux zones réservoirs est donné par Gasda *et al.* (2008). Le principe est de pressuriser le réservoir du bas et de mesurer les variations de pression du réservoir du haut. Le problème majeur de ce type de tests est leur faible sensibilité dans la gamme de perméabilité comprise entre celle du réservoir et de la roche de couverture. Ils ne permettent donc de mesurer que les très faibles ou les grandes perméabilités équivalentes.

⁴ Le terme « perméabilité équivalente du puits » est généralement utilisé pour caractériser l'étanchéité au niveau de l'interface ciment-roche. L'idée est de représenter l'ensemble {roche de couverture-interface-ciment} par un matériau homogène, hydriquement équivalent. Dans le cadre de ces essais, seule la perméabilité verticale est caractérisée.

2.4.2 Les mesures indirectes

Les diagraphies de cimentation de puits sont utilisées pour déterminer la qualité de la jonction entre le ciment de puits et le cuvelage ainsi que pour estimer le taux de remplissage en ciment de l'espace entre le cuvelage et la formation rocheuse.

Diagraphies de température

Les diagraphies de températures sont réalisées lors de la prise du ciment afin d'estimer le toit de la cimentation (l'hydratation étant un phénomène exothermique) (Crain, 2005). Un toit de cimentation non-conforme avec la prédiction est l'expression d'un problème de remplissage de l'annulaire (fuite de ciment, mauvais contrôle de la densité fluide, mauvais *mud-removal* ...).

Diamètreur multi doigts

Un diamètreur est un outil permettant de mesurer le diamètre interne du puits avec une précision de l'ordre du millimètre. Les anomalies de diamètre sont l'expression de corrosion, d'usure ou d'autres dommages dans le puits (Duguid et Tombari, 2007). Sachant que la corrosion du cuvelage est souvent l'expression d'une mauvaise cimentation (Watson et Bachu, 2007), le diamètreur permet également d'avoir une information indirecte sur l'état de cimentation du puits.

Diagraphies soniques

L'investigation de la cimentation des puits par diagraphies soniques date des années 1960. Le plus couramment utilisé, car simple et peu onéreux, est le CBL (*Cement Bond Logs*) (Crain, 2005). Il permet d'avoir accès à deux valeurs (Jutten & Morriss, 1990; Crain, 2005; Duguid et Tombari, 2007):

- le « *Bond Index* », donnant une information quantitative du lien entre le ciment et le cuvelage. Il est calculé comme le rapport entre l'atténuation du signal sonique en un point donné et du signal acoustique le plus atténué (situé généralement au pied de cimentation). Un « *Bond Index* » compris entre 0.8 et 1 correspond traditionnellement à un bon lien.
- le « *Variable density log* » qui est la représentation de la magnitude du train d'onde au niveau du récepteur. Il permet d'avoir des informations sur les liens ciment-cuvelage et, dans certain cas, ciment-formation.

Dans les zones de faible atténuation, l'interprétation de ces valeurs est délicate, car elles sont dépendantes des formations rapides⁵, du liquide emplissant le micro-annulaire, et de l'état du ciment. Ainsi, d'après Loizzo, (2008), ce type de mesure ne

⁵ Lorsque la vitesse de l'onde P traversant le fluide du trou foré est inférieure à la vitesse de l'onde S au travers de la formation entourant le puits.

donne des résultats soumis à aucune ambiguïté que dans le cas d'une bonne cimentation.

Diagraphies ultrasoniques

Dans les années 1990, les diagraphies ultrasoniques (USIT/IS⁶) ont commencés à être utilisées. Ces mesures permettent d'avoir des informations sur le diamètre interne du cuvelage, son épaisseur et sur l'interface cuvelage-ciment. L'étude de l'impédance acoustique permet également d'avoir des informations sur le matériau jouxtant le cuvelage et sur l'interface suivante (ciment-formation ou autre interface ciment-cuvelage) (Crain, 2005, Duguid et Tombari, 2007).

Le succès de l'interprétation des mesures ultrasonique dépend cependant de la connaissance de l'impédance acoustique du cuvelage et du fluide du puits. Ce qui est problématique dans le cas des puits anciens, où il faut nettoyer le fluide du puits avant de réaliser les mesures. Enfin, Duguid et Tombari, (2007) préconisent d'utiliser les résultats du diamètreur afin de vérifier la valeur du diamètre intérieur du cuvelage obtenu par mesures ultrasoniques.

2.4.3 Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'existence d'un nombre important de moyens de contrôle de la cimentation du puits. Cependant, aucun des moyens cités ne se suffit à lui-même. C'est pourquoi, selon Duguid et Tombari, (2007) il faudrait au minimum faire la batterie de tests non destructifs, en prenant soin, si possible, d'utiliser des outils ultrasoniques permettant l'investigation de l'interface ciment formation (du type IS). De plus, avant d'entamer la procédure d'abandon, il serait recommandé de réaliser au minimum une mesure de perméabilité de l'espace annulaire, ainsi qu'une analyse de fluide afin de pouvoir alimenter les modélisations d'évolution de l'état du puits.

Cependant, l'ensemble de ces données est très rarement, voire jamais, disponible dans les rapports de fin de sondage et/ou rapports d'abandons. A titre d'exemple, l'étude réalisée dans le cadre du projet ANR-Géocarbonate Intégrité portant sur 22 puits du Bassin de Paris a montré que seuls 3 comportaient au moins un log de cimentation et de corrosion et aucun ne mentionnait les logs de température, et les tests de pressions de cuvelage (Pironon *et al.*, 2007).

Quand bien même, ces mesures ne sont valables qu'au moment de leur réalisation, pouvant dater de plus d'une soixantaine d'années, et ne peuvent donc pas garantir l'état de la cimentation à l'heure actuelle (altérations chimiques, variations de pressions-températures-contraintes du milieu).

La mise au point d'une classification se basant uniquement sur les résultats des tests de contrôle de la bonne mise en œuvre du puits n'est donc pas possible. Une

⁶ USIT = UltraSonic Imager Tool; IS = Isolation Scanner

alternative à étudier est la mise au point d'indicateur « théoriques » permettant d'avoir une estimation de l'étanchéité de puits avec un minimum de données d'entrées. Les moyens de contrôles explicités dans ce chapitre pourraient, dans ce cas, être utilisés afin de vérifier les indicateurs ainsi mis en place.

2.5. INDICATEURS « THEORIQUES » DE FUITE

En cohérence avec les processus de fuite identifiés au §2.3, une classification de puits exhaustive devrait pouvoir prendre en compte à la fois les propriétés du coulis de ciment, et ses interactions à court, moyen et long terme avec le milieu environnant. Face à cette complexité, l'enjeu est de construire des indicateurs nécessitant un minimum de données d'entrées et permettant de vérifier les données disponibles des puits existants avec ou sans problèmes de fuite.

2.5.1 Indicateurs de migration de gaz

L'indicateur le plus couramment utilisé est le potentiel de fuite (**GFP** : *Gaz Flow Potential*) introduit par Sutton *et al.* en 1984 (cité par Parcevaux *et al.*, (1990)). Cet indicateur part du principe que pendant le travail de cimentation, le ciment est encore sous forme fluide et que sa densité, supérieure à celle du fluide de formation, empêche la remontée du fluide de formation par équilibre des pressions hydrostatiques. Cependant, en cours d'hydratation la matrice commence à se former et le développement de sa résistance statique (i.e. force attractives entre les particules), ainsi que les variations de volumes (perte en eau, retraits d'hydratation, variations locales de température) induisent une réduction de la pression fluide (ou pression de pore) du ciment, qui devient inférieure à la pression de formation. La période critique pendant laquelle le fluide de formation peut entrer dans l'annulaire est alors comprise entre le moment où la décroissance en pression de pore est suffisante pour l'intrusion de fluide dans le ciment en cours d'hydratation et le moment où la matrice cimentaire a atteint une suffisamment faible perméabilité pour empêcher l'intrusion du fluide de formation. Une illustration de ce phénomène est reportée en Figure 6.

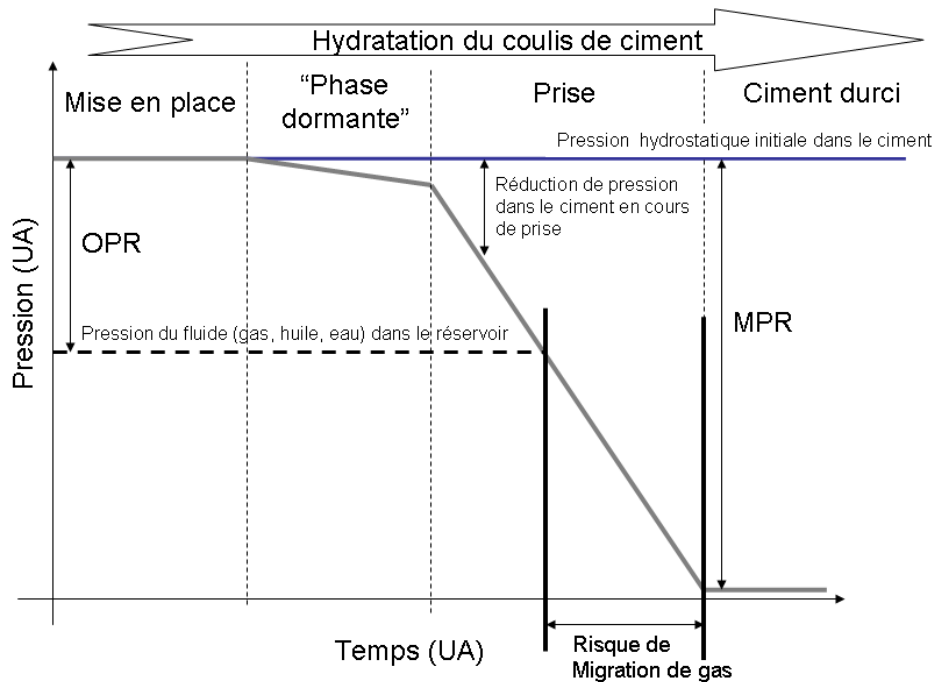


Figure 6. Evolution du risque de migration de gaz lors de l'hydratation du coulis de ciment. Adapté de Khodadadi, (2008)

Le potentiel de fuite est défini comme le rapport entre la chute de pression fluide maximale dans le ciment⁷ ($MPR = 1.67 L / (D_h - D_p)$) et la différence entre la pression initiale dans le coulis de ciment et la pression de formation ($OPR = p_c - p_h$). Il varie de 0 à l'infini. Généralement, les puits avec un GPF inférieur à 4 sont considérés comme non critiques, ceux avec un GPF compris entre 4 et 8 représentent un risque modéré et ceux supérieurs à 8 un risque sévère.

Une autre étude développée par Rae *et al.* en 1989 (cité par Parcevaux *et al.*, (1990)) décrit une méthode alternative basée sur l'identification de 4 facteurs : le facteur de formation (**FF**), le facteur hydraulique (**HF**), le facteur de « *mud removal* » et un facteur relatif aux performance du coulis en ciment.

L'approche de Sutton propose un modèle où seule la résistance du gel est un facteur affectant la fuite tandis que l'approche de Rae considère un flux de gaz au travers de la matrice cimentaire évoluant. Cependant aucun modèle ne peut prédire l'occurrence de la migration des mois après le travail de cimentation, ni le lien entre une éventuelle migration de gaz et une fuite de gaz. Ainsi, de nombreux auteurs (Wojtanowics *et al.*,

⁷ Le concept du GPF est basé sur le fait que la migration de gaz s'effectue par percolation au travers de la matrice cimentaires et que cette invasion peut être stoppée par la résistance du gel de ciment. La technique suppose qu'un gel de 240 Pa à une résistance suffisante pour stopper la migration des bulles de gaz.

2000 ; Khodadadi, 2008) mettent en évidence l'absence de corrélation entre ces indicateurs de migration de gaz et les données de puits existants.

2.5.2 Approche statistique : classification des puits

A la lumière des études de puits fuyants de Wojtanowics, (2000) dans le golfe du Mexique et de Khodadadi, (2008) dans le champ gazier de Khangiran (nord-est de l'Iran dans la région de Sarakhs), il apparaît que les points suivant seraient de bon indicateur de la pérennité des puits :

- l'opérateur,
- la localisation du puits, notamment en raison des conditions de fond de puits (pressions, contraintes, température, présence de H₂S /CO₂) et de la lithologie (notamment caractéristiques thermique, mécanique et rhéologique des roches rencontrées),
- les matériaux utilisés (type de ciment + additifs, type de boue de forage)
- la configuration du puits
- la qualité de la mise en œuvre (centrage du cuvelage, mud removal, volume de ciment pompé et position de la tête de cimentation, problèmes divers rencontrés lors du forage, ...)
- les diagraphies de cimentation (CBL, ...)

Le problème de ce type de classifications est la difficulté à obtenir les informations nécessaires (notamment sur les matériaux utilisés et la qualité de la mise en œuvre).

Devant cette difficulté, l'originalité de l'approche de Watson & Bachu, (2007) a été de faire la démarche inverse en essayant d'établir un lien entre les données facilement accessibles et le risque de fuite (estimé par des mesures SCVF ou GM (voir §2.4.1) sur environ 500 puits dans le bassin de l'Alberta). Le choix d'utiliser les mesures de fuite en surface pour classer les puits, bien qu'a priori discutable car probablement pas assez discriminante, a été opéré en raison de la quantité et la qualité des données disponibles. Il est apparu que le risque de fuites est majoritairement piloté par :

- la localisation géographique du puits ;
- la déviation : un puits dévié a plus de chance de fuir ;
- le type de puits : la grande majorité des puits abandonnés fuyant sont tubés ;
- la méthode d'abandon : les modes d'abandon avec bouchon provisoire recouvert de ciment sont moins fiables (forte probabilité de non présence ou de détérioration précoce du chapeau en ciment). La mise en place de bouchons en

ciment entre chaque intervalle ou l'utilisation d'un obturateur (ou presse-étoupe) de cimentation⁸ est préférable pour une tenue à long terme ;

- le prix du pétrole au moment du forage. Une forte demande en exploration pétrolière (notamment entre les années 1973 et 1999) induit une baisse de la disponibilité des équipements et tend ainsi à augmenter le risque de puits fuyants ;
- la cimentation du cuvelage. Notons que sur les premiers forages, la cimentation du cuvelage n'était pas obligatoire au dessous d'une certaine profondeur. Ce point peut donc s'avérer problématique dans le cas du stockage géologique du CO₂ ;

Une légère corrélation peut être également faite en fonction de :

- la compagnie en gestion du forage ;
- la profondeur du cuvelage de surface (cf. figure 2) (uniquement pour les sources situées au dessus du pied du cuvelage de surface) ;
- la profondeur du forage ;
- la densité des puits ;
- la topographie ;

Les limitations majeures de cette étude sont géographiques et temporelles. Géographique car seul le bassin de l'Alberta a été étudié. Etant donné que le lien entre les indicateurs de durabilité et la risque de fuite est basé exclusivement sur une étude statistique, la généralisation à tous type de bassin sédimentaire, quelque soit son histoire, semble un peu rapide (notamment pour les critères « localisation géographique du puits, prix du pétrole et compagnie en gestion du forage »). Et temporelle, car il est impossible de disposer de données suffisamment anciennes (supérieures à 100 ans) afin de bâtir, par ce biais, une classification prenant en compte le vieillissement à long terme de l'intégrité d'un puits, chose indispensable dans le contexte du stockage géologique du CO₂.

Cette analyse a été complétée en 2008 (Watson & Bachu, 2008) afin de pouvoir tenir compte des fuites « profondes » (par opposition aux fuites de surface étudiées dans l'étude de 2007) et de la dégradation des matériaux constitutifs du puits (ciment, acier, matières plastiques) en présence de fluide agressif (CO₂, H₂S, ...) (cf. annexes 1 et 2). Concrètement, les quatre critères retenus dans cette étude sont :

⁸ Dispositif utilisé soit pour parfaire la cimentation incomplète d'un cuvelage, soit pour rendre étanches certaines couches de terrain traversées par un sondage; il réalise, au niveau voulu, l'étanchéité entre le train de tiges ou le train de cuvelage et la paroi intérieure du cuvelage ou la paroi du trou, et le ciment que l'on injecte remonte derrière le cuvelage à travers les perforations que l'on y a faites.

- la qualité du ciment utilisé : L'influence de l'acidité du milieu sur le matériau cimentaire dépend de sa formulation (Allahverdi, 2000) et de la qualité de sa mise en œuvre. Notons par exemple l'ajout courant de bentonite, permettant d'augmenter l'ouvrabilité du ciment, augmente la porosité et la vulnérabilité à la corrosion. De même l'ajout de gypse très soluble conduit à la détérioration rapide du ciment. Les additifs inertes sont considérés dans l'étude comme ayant peu d'influence sur la détérioration du ciment en présence de CO₂. L'évaluation se base sur le type de ciment présent au fond du puits (informations détaillées après 1986) ;
- l'occurrence d'activité de stimulations et/ou perforations : Classiquement, les méthodes de stimulations utilisées dans l'industrie pétrolière sont la fracturation hydraulique et l'acidification. Les fissures et les dégradations ainsi provoquées sont susceptibles de réduire la capacité d'un puits à résister à la remontée de CO₂. En effet, ce dernier peut remonter à travers les fissures provoquées par la fracturation ou les perforations. Et l'acidification peut augmenter la nocivité du milieu environnant. L'étude considère que : plus un puits est stimulé plus il y a de risques que le cuvelage, le ciment et /ou le bouchon soient endommagés ;
- la méthode d'abandon utilisée : les trois méthodes d'abandon décrites au §2.2.2 sont étudiées. La méthode utilisant un bouchon de support (*bridge-plug*) et la mise en place du ciment par le biais d'un *dump-bailer*⁹ est considérée comme ayant une durée de vie plus courte. Notamment en raison de rupture mécanique couramment observée sur ce type de bouchon suite aux changements de pression et de chimie dans le puits.

2.5.3 Approche déterministe : analyse quantitative du risque de fuite

Les méthodes d'analyse déterministe des risques sont coûteuses à mettre en œuvre, mais, contrairement à une classification statistique, elles permettent de fournir une quantification du risque prenant en compte, de manière précise, le vieillissement de la structure. Ce type d'approche a été appliqué par **Poupart et Giry, (2009)** au cas des puits abandonnés susceptibles de rencontrer le panache de CO₂. Globalement, la méthodologie repose sur:

- l'identification de familles de puits, définies sur la base des données de terrain (rapports de fin de sondage, diagraphies, ...). Chaque famille sera représentée par un « système type » en termes de géométrie, matériaux, environnement, ... ;
- l'identification de scénarios (ex. bouchon fracturé, interface ciment-couverture défectueuse, ...), dont la fréquence sera à estimer en fonction de la famille de puits sur la base des données disponibles et/ou d'avis d'experts.

⁹ Outil tubulaire utilisé pour couler des petits volumes de coulis de ciment ou d'un matériau similaire dans un puits foré.

Pour chaque famille de puits et chaque scénario, la sévérité en termes de fuite de CO₂ est estimée via des simulations à long terme (transport réactif, thermomécanique). L'exploitation de ce type de résultats peut se faire suivant plusieurs méthodes. Celle explicitée par **Patroni, (2007)** consiste à bâtir, pour chaque famille de puits, un indicateur moyen de rupture de puits, calculé comme la moyenne des risques de rupture (entre 0 et 1) de chaque scénario pondérés par leur sévérité. L'avantage de ce type d'approche est de permettre, une classification aisée et rapide, même dans le cas d'un très grand nombre de puits.

L'approche développée par Oxand (**Poupart et Giry, 2009**) repose, quant à elle, sur la mise au point de seuils admissibles du couple (fréquence, sévérité) pour chaque scénarios considéré. L'avantage de cette méthodologie est l'identification aisée des scénarios les plus préjudiciables vis-à-vis de l'intégrité d'une famille de puits. Ce qui permet de mettre en place, en parallèle à l'étude d'analyse de risque, de propositions de remédiation afin d'atténuer la sévérité des scénarios mis en cause. Cependant, on peut se demander si cette méthode d'exploitation des résultats n'est pas un peu trop ambitieuse au regard de la fiabilité des données d'entrées disponibles et de nos connaissances réelles sur le comportement à long terme d'un puits en présence de scCO₂ + gaz annexes. En fait, lorsque l'objectif est d'étudier un ensemble de puits, cette méthode devrait être appliquée d'une manière statistique. Ce type d'approche deviendrait alors comparable aux méthodologies d'évaluation de risque sismique basées sur les typologies standard des bâtis.

Quoiqu'il en soit, il apparaît que des méthodes robustes d'analyse de risque associé à l'intégrité des puits sont déjà opérationnelles. Cependant, les résultats ainsi obtenus sont fortement dépendants des types de simulations effectuées et méthodes utilisées pour construire les familles de puits et pour identifier les scénarios. N'ayant pas accès à ces données, il apparaît impossible de formuler, à priori, un avis critique sur ces méthodes.

2.6. CONCLUSION

L'étude conduite dans ce chapitre a mis en évidence qu'il n'est pas réaliste de mesurer directement, l'état, et l'évolution, de l'ensemble des puits susceptibles d'être sollicités à la suite d'une injection de CO₂. L'option apparaissant la plus pertinente est la construction de « classifications à grande échelle », s'appuyant sur les données de puits de bassin bien documentés comme le Bassin de l'Alberta (données disponibles en ligne sur <http://www.eub.gov.ab.ca>) ou le Bassin de Paris (données bientôt disponibles en ligne via le guichet H mis en place par le BRGM). Le but est de donner, avec un minimum de données d'entrée, une idée géo-référencée du risque de fuite à l'échelle d'un bassin sédimentaire.

Concrètement, deux types de méthodologies sont susceptibles d'être utilisées : les classifications des puits basés sur une approche statistique, illustrée par l'étude de **Watson et Bachu, (2007,2008)** et l'analyse de risque basée sur une approche déterministe, illustrée par l'étude de **Poupart et Giry (2009)**.

Le domaine d'application de ces deux méthodologies est différent :

- l'approche statistique à pour but d'évaluer « globalement » le niveau de sécurité d'une zone de stockage en vue d'une sélection de site ;
- l'approche déterministe, est située plus en aval et a plutôt pour vocation la vérification d'un site de stockage et/ou la mise en évidence des opérations de remédiations à mettre en place sur certains puits (ou typologies de puits) identifiés comme préjudiciables, afin d'assurer la pérennité du stockage. Ainsi, cette action est complémentaire mais n'entre pas dans le cadre de la présente étude.

La méthodologie que nous proposons pour la classification des puits peut ainsi se résumer à:

1. la mise en place d'une classification « statique » de puits, basée sur l'approche de **Watson et Bachu, (2007)**, mais applicable au contexte français. C'est-à-dire, définir des grandes catégories de puits, basée sur les critères localisation, la déviation, l'architecture du puits, la méthode d'abandon et la cimentation du cuvelage, ... pertinents vis-à-vis de la population de puits pétroliers, gaziers et géothermaux présents sur le sol français. Les critères retenus sont reportés au Tableau 3.
2. la mise en place d'une classification « dynamique » s'inspirant de l'approche de **Watson et Bachu, (2008)**, mais intégrant également les contraintes liées aux risques de rupture mécanique des constituants du puits et proche-puits. Compte tenu de l'étude bibliographique du §2.3, les critères suivants ont été retenus :
 - Le type d'acier utilisé. Le problème de la corrosion des cuvelages, qui est inévitable compte tenu l'échelle de temps considéré dans le contexte du stockage géologique du CO₂) et ses conséquences sur 1/ l'intégrité du cuvelage et 2/ l'intégrité de la cimentation (contraintes engendrées par la formation expansive des oxydes de fer résultant de la corrosion de l'acier) est certainement de première importance.
 - La lithologie (critère environnemental) :
 - impact thermo-mécanique : suivant le type de roche entourant le puits, la tenue des interfaces acier/ciment et ciment/roche lors des variations in-situ de pression et température sera différente. En plus du type de roche traversée, cet impact dépendra des conditions initiales du système (champs de contrainte, température et pression *in-situ*)

- impact chimique : les grands types de roches « pénétrés » par les puits (grès, carbonates, argiles) contiennent des fluides caractéristiques en termes de teneurs ioniques et surtout de pH qui vont altérer de manière distincte les matériaux et notamment le ciment.
3. La mise en place des seuils et des coefficients de pondérations des critères de classification retenus.
 4. Validation des critères sélectionnés sur puits ayant connus des évènements de fuite mesurés et/ou disposant de suffisamment de données relatives aux tests de cimentation et de cuvelage (cf. §2.4)

3. Adaptation et applicabilité de la classification Watson et Bachu au contexte français

3.1. ADAPTATION DE LA CLASSIFICATION WATSON ET BACHU AUX DONNEES DISPONIBLES EN FRANCE

Une étude préliminaire à ce rapport a été réalisée par Garaffa (2009) afin de confronter les classifications Watson et Bachu (2007) et (2008) aux données disponibles dans les rapports de fin de sondages et les rapports d'abandons. Pour se faire, les puits d'hydrocarbures du bassin de Paris ont été considérés comme terrain de jeu. Il est apparu que les données nécessaires à évaluer les critères retenus par la classification de Watson et Bachu (2008) concernant le risque de fuite en profondeur n'étaient pas accessibles.

Nous avons ainsi décidé de nous concentrer sur les critères de la classification Watson et Bachu (2007) sur les fuites de surface. Conformément à cette étude et au travail de Garaffa (2009), nous avons retenu les critères suivants :

- Type de puits (avec ou sans cuvelage) : dans la mesure où une majeure partie des forages contient des intervalles sans cuvelage et d'autres avec cuvelage, nous considérons qu'un forage est avec cuvelage si il a un intervalle avec cuvelage qui intercepte le réservoir (Dogger ou Keuper). En effet, cette présence de cuvelage interceptant le réservoir est interprétée par Watson et Bachu (2007) comme source de chemins de fuite supplémentaires (à travers les annulaires) favorisant les occurrences de SCVF et de GM.
- Date d'abandon : Elle est comparée à la date du 22 mars 2000 qui correspond à l'adoption du titre forage du règlement général des industries extractives, qui rend obligatoire des recommandations sur le bouchage des forages (<http://www.industrie.gouv.fr/sdsi/dtss/reql/cdrgie/FO.htm#s4>).
- Cimentation atteignant ou non la surface : Le critère "cimentation n'atteignant pas la surface" sera affecté à un forage si ce dernier n'a pas au moins un intervalle de cimentation dont le sommet arrive à la surface ($z = 0$).
- La déviation ou non du puits : Un puits est dévié si sa profondeur verticale totale (TVD) est inférieure à sa profondeur totale (TD).

- La date du forage : Cette date, qui permet de prendre en compte l'ancienneté du forage, est comparée à la date de 1980 qui correspond au point d'inflexion de la courbe de répartition du nombre de forages entre 1954 et 2003 (Vernoux *et al.*, 2003).

Formations aquifères	Formations imperméables ou semi-imperméables	Système
Aquifère multicouche des Sables de Fontainebleau et des Calcaires de Brie	Marnes à huîtres	OLIGOCENE
	Marnes vertes de Romairville	
	Marnes supragypseuses	
Aquifère multicouche du Calcaire d Champigny		EOCENE SUPERIEUR
Marnes et caillasses du Lutétien		EOCENE MOYEN ET INFERIEUR
Calcaire grossier du Lutétien		
	Arkose de Breuillet Argiles plastiques	
Aquifère de la Craie		CRETACE SUPERIEUR
	Craie grise Craie inférieure Argile de Gault	
Aquifère de l'Albien		
Aquifère du Néocomien-Barrémien	Argiles et marnes de l'Aptien	CRETACE INFERIEUR
	Argiles bariolées du Barrémien	
Aquifère du Thitonien		JURASSIQUE SUPERIEUR
	Marnes et calcaires marneux	
Aquifère du calcaire Lusitanien		
	Marnes oxfordiennes Argiles calloviennes	JURASSIQUE MOYEN
Aquifère du Dogger		
	Argiles du Bajocien	JURASSIQUE INFERIEUR
	Formations du Lias	
Aquifère du Keuper		TRIAS
	SOCLE	

Figure 7. Lithostratigraphie simplifiée utilisée dans le cadre de l'étude. D'après (Szymanski *et al.* 2007)

Pour vérifier les critères de la classification, nous avons besoin de sélectionner les puits abandonnés et « *susceptibles* » de traverser un site de stockage de CO₂. Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré l'aquifère du Dogger (Jurassique), qui est l'un des deux aquifères profonds traditionnellement considéré comme cible pour le stockage du CO₂ dans le bassin de Paris. Nous disons « *susceptible* » parce que la base de données (Vernoux et al., 2003) permet uniquement d'accéder aux étages géologiques traversés, et non aux faciès. L'identification des zones aquifères réellement cibles du stockage nécessiteraient le développement d'un traitement relativement complexe qui nécessite un modèle géologique succinct et l'exploitation des coordonnées des puits, ce qui est hors contexte de l'étude méthodologique présentée ici.

Le modèle qui a été choisi est représenté sur la Figure 7. Pour plus de précisions, il faudrait prendre en compte le référentiel des systèmes aquifères français (BDLISA). Tout puits atteignant au moins le jurassique moyen est supposé atteindre ou impacter l'aquifère du Dogger. Cependant, seules les zones où le toit du Jurassique moyen est compris entre 800 et 1600 m ont été considérées comme site potentiel de stockage de CO₂. La limite de 800 m correspond à la profondeur à partir de laquelle les conditions de pression et température permettent de maintenir le CO₂ dans un état supercritique, favorable à l'injectivité et la capacité de stockage. La limite basse a été estimée d'après les travaux de Szymanski *et al* (2007).

3.2. LA BASE DE DONNEES "FORAGES PROFONDS"

Afin de vérifier l'applicabilité de la classification mise en place dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la base de données mise au point par Vernoux *et al.*, (2003), dans le cadre d'une convention liant le BRGM et l'agence de l'eau Seine-Normandie. Elle est constituée de 3482 forages dont 2590 forages pétroliers, 119 forages géothermiques, 435 forages de stockage de gaz et 338 forages d'eau. Les données relatives aux forages proviennent essentiellement des fichiers du Bureau Exploration-production des Hydrocarbures, de la DRIRE Ile-de-France, de GDF, du BRGM, et des rapports de fin de sondage et des rapports d'abandon. Les forages d'eau (non profonds) n'ont pas été utilisés dans cette étude, donc un total de 3144 forages sont concernés.

La table principale nommée "FORAGE" contient les principales caractéristiques des puits qui sont :

- Son identification
- Des dates (fin de forage, abandon)
- Type de forage
- Etat actuel (abandonné ou en exploitation)
- Profondeur
- Cimentation et cuvelage

- Bouchage (pour les puits abandonnés)
- Etc.

La table principale "FORAGE" est en relation avec un certain nombre de tables (lexiques) qui complètent la description des forages. Il s'agit de :

- Fluide du forage
- Type ciment
- Niveau (niveaux géologiques traversés)
- Description cuvelage
- Description cimentation
- Etc.

Les tables "Forage", "Description_Cuvelage", "Est_Cimenté" et "Niveau" ont été essentiellement utilisées dans les requêtes permettant la vérification des critères.

3.3. VERIFICATION DES CRITERES DANS LA BASE DE DONNEES "FORAGES PROFONDS"

3.3.1 Résultats bruts

La requête SQL faite sur la table "FORAGE" renvoie un nombre de 216 puits atteignant le Jurassique moyen et donc supposés atteindre ou pouvant impacter l'aquifère du Dogger, ce qui représente environ 7% du nombre total de forages profonds. Les autres requêtes permettant de vérifier les critères retenus de Watson et Bachu (2007), sont faites sur ces 216 puits. Les résultats sont les suivants :

- Type de puits :
 - Absence de description du cuvelage : 31 forages
 - Avec cuvelage pouvant intercepter le Dogger : 122 forages
 - Sans cuvelage (intervalle) pouvant intercepter le Dogger : 63 forages
- Date d'abandon :
 - Avant 2000 : 114 forages
 - Après 2000 : 11 forages
 - Sans date abandon : 91 forages
- Cimentation atteignant ou non la surface :
 - Intervalles de cimentation connus : 216 forages
 - Cimentation atteignant la surface : 35 forages
 - Cimentation n'atteignant pas la surface : 181 forages

- La déviation ou non du puits¹⁰ :
 - Puits déviés : 51 forages
 - Puits non déviés ou [COTE_FIN] non renseigné : 165 forages
- La date du forage :
 - Avant 1980 : 95 forages
 - Après 1980 : 121 forages

Nous récapitulons sur le tableau 2 la disponibilité des critères dans les 216 puits pouvant intercepter le Dogger. Le détail des résultats bruts obtenus est reporté en Annexe 3.

	Type de puits	Date abandon	Cimentation	Déviation du puits	Date du forage
Disponibilité sur les 216 puits	85.6%	57.87%	100.00%	100% ou 23.61%	100.00%

Tableau 2. Disponibilité des critères sur les 216 puits abandonnés et pouvant intercepter le Dogger

3.3.2 Calcul du risque de fuite en surface

Le calcul du risque de fuite en surface associé à chaque puits pouvant intercepter l'aquifère du Dogger a été effectué en affectant à chaque critère un coefficient, le risque global s'en déduisant en multipliant ces coefficients entre eux. Le tableau 3 donne les coefficients retenus pour chaque critère. Ces coefficients déterminés par Watson et Bachu (2008) ont été statistiquement justifiés. Ainsi un puits tubé a une plus grande tendance à présenter des fuites en surface (SCVF) qu'un puits non tubé. Cette tendance étant probablement due au fait que le tubage introduit un annulaire (chemin de fuite) supplémentaire (interface casing-cimentation), voir §2.5.2.

Nous avons vu que l'absence d'informations concerne les critères "Type de puits" et "Date d'abandon", les autres critères étant totalement renseignés. Cette absence d'information sera prise en compte en affectant à ces deux critères lors du calcul du risque, soit la valeur maximale pour ce critère, soit la valeur minimale. Comme deux critères sont concernés, cela correspond, pour le risque, à un maximum de quatre possibilités pour chaque forage. Une analyse statistique permettra de calculer le risque moyen pour chaque forage ainsi que de déterminer la variabilité introduite par cette prise en compte de l'absence d'information.

¹⁰ A partir du tableau forage, nous avons considéré que le champ [PROF_TVX] correspond à TD et TVD correspond à – [COTE_FIN]. Les forages où le champ [COTE_FIN] n'est pas renseigné sont considérés comme non déviés. En effet, on peut remarquer que si [COTE_FIN] est renseigné alors le puits est dévié, ce qui tendrait à aller dans le sens de cette hypothèse.

Les intervalles de cimentation étant connus pour tous les puits, le risque global maximum qui peut être associé à un puits est de 900, alors que le risque minimum est de 1. Le risque global moyen sur les 216 puits, en prenant en compte l'absence d'informations est égale à 133.6, alors que l'écart-type est de 60.

La Figure 8 montre l'évolution du risque associé à un forage en tenant compte de l'absence d'informations. Cinq courbes sont représentées et correspondent respectivement au calcul du risque avec :

min_min : Quelque soit le critère, on assigne la valeur minimale (1) dans le cas d'une absence d'information. C'est la notation retenue dans le cas de la classification Watson et Bachu (2008).

min-max : Si le critère « date abandon » n'est pas renseigné, on lui assigne la valeur maximale (5), tandis que si le critère « type de puits » n'est pas renseigné on lui assigne la valeur minimale (1),

max-min : Si le critère « date abandon » n'est pas renseigné, on lui assigne la valeur minimale (1), tandis que si le critère « type de puits » n'est pas renseigné on lui assigne la valeur maximale (8),

max-max : Quelque soit le critère, on assigne la valeur maximale dans le cas d'une absence d'information.

Critère	Valeur
Puits avec cuvelage	8
Puits sans cuvelage	1
Absence information	8 ou 1
Date d'abandon antérieure à 2000	5
Date d'abandon postérieure à 2000	1
Absence information	5 ou 1
Cimentation n'atteignant pas la surface du puits	5
Intervalles de cimentation inconnus	4
Autres cas	1
Puits dévié	1,5 (sinon 1)
Date de forage avant 1980	3 (sinon 1)

Tableau 3 : Coefficients attribués aux critères pour le calcul du risque avec prise en compte de l'absence d'informations. D'après Watson et Bachu (2008)

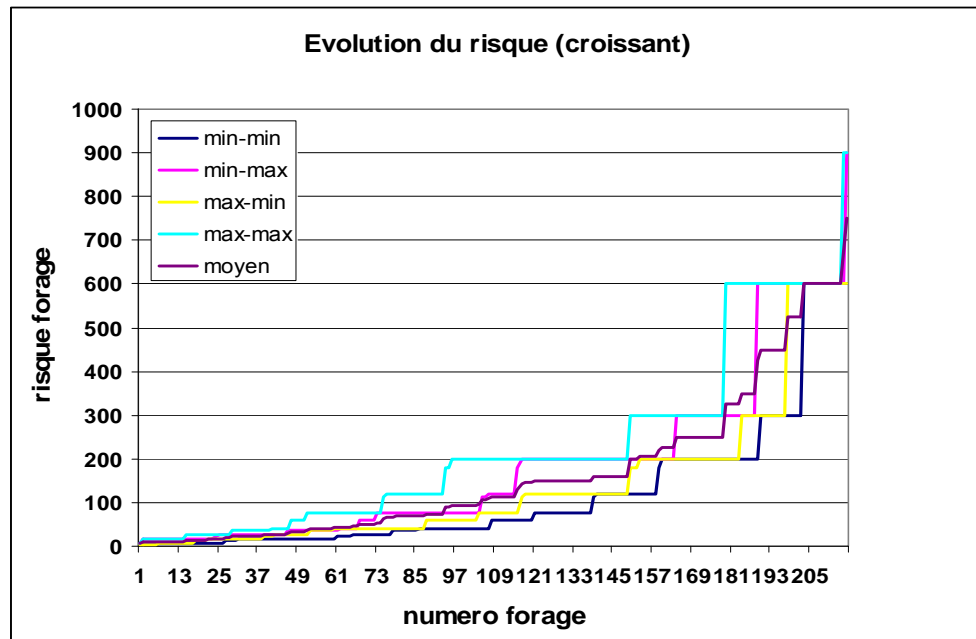


Figure 8. Comparaison de l'évolution du risque sous différente prise en compte de l'absence d'informations. L'abscisse correspond au nombre de puits pris en compte et l'ordonnée au risque cumulé.

3.4. CLASSES DE RISQUE

Avec les critères de la classification de Watson et Bachu (2007), et les coefficients affectés à chaque critère, nous avons calculé les valeurs de risque possible pour un puits. Nous avons pris en compte l'absence d'information en affectant le coefficient maximum pour les deux critères concernés, à savoir " Type de puits" et "Date d'abandon". L'arbre de risque qui a été déterminé a 32 branches (5 critères, deux possibilités pour chaque critère et donc $2^5=32$ branches) et est reporté en Figure 9. Certaines branches sont imbriquées. Il en ressort quatre classes de risque dont les définitions sont les suivantes¹¹ :

- **Risque élevé** : le risque du forage doit être supérieur ou égal à 200 et inférieur ou égal à 900. Dans l'arbre de classification, les puits étant dans cette classe de risque correspondent en fait aux puits avec cuvelage, abandonnés avant 2000 et dont la cimentation n'arrive pas à la surface. Soit $2^2 = 4$ branches au total.

¹¹ L'application directe de l'arbre de classification reporté dans Watson & Bachu, (2007) avec les valeurs que nous avons attribuées aux critères, donne un arbre avec des branches imbriquées. Pour éviter cela nous avons légèrement modifié ce dernier en intervertissant des critères.

- Risque moyen : le risque du forage doit être supérieur ou égal à 40 et inférieur ou égal à 180. Les forages présentant un tel risque sont en fait les forages avec cuvelage abandonnés avant 2000 et dont la cimentation arrive à la surface, les forages avec cuvelage, abandonnés après 2000 et dont la cimentation n'arrive pas à la surface, et les forages sans cuvelage, forés avant 1980, abandonnés avant 2000 et dont la cimentation n'arrive pas à la surface. Soit un total de $2^2+2^2+2^1 = 10$ branches
- Risque faible : le risque du forage doit être supérieur ou égal à 24 et inférieur ou égal à 37.5. Cette classe correspond aux forages avec cuvelage abandonnés après 2000 et dont la cimentation arrive à la surface, ainsi qu'aux forages sans cuvelage forés après 1980 et abandonnés avant 2000 et dont la cimentation n'arrive pas à la surface. Soit $2^2+2^1 = 6$ branches.
- Risque très faibles : le risque du forage doit être compris entre 1 et 22.5. Il s'agit des forages sans cuvelage, abandonnés avant 2000 et dont la cimentation arrive à la surface, et les forages sans cuvelage abandonnés après 2000. Soit $2^2 + 2^3 = 12$ branches.

Le calcul qui a été effectué à l'aide d'un programme Matlab nous permet de connaître les puits qui composent chaque classe de risque et leur nombre. Pour cette étude, nous avons considéré les deux cas extrêmes « **min_min** » et « **max_max** » afin de prendre en compte l'influence de l'absence d'information. La composition des classes de risque est représentée en Annexe 4 de ce rapport et les répartitions obtenues dans les deux cas étudiés sont reportées en Figure 10 et au Tableau 4.

Dans le cas « **max_max** » où l'absence d'information conduit à un risque maximal, on remarque que 56,02% des forages ont un risque de fuite en surface très élevé. Cette répartition s'explique par le fait que 122 forages sur les 216, soit 56.5%, ont un cuvelage pouvant intercepter le réservoir, 84% ont une cimentation n'arrivant pas à la surface et 95% ont une date d'abandon antérieure à 2000 (à cause de la manière dont nous avons pris en compte l'absence d'information), or ces trois critères sont très pénalisants pour les puits qui le vérifient.

Dans le cas « **min_min** » où, de manière identique à l'étude Watson et Bachu (2008), l'absence d'information conduit à un risque minimal (valeur du critère =1), on remarque de seuls 26,39 % des forages ont un risque de fuite élevés, tandis que les forages conduisant à un risque faible passent de 6,48% à 28,70%.

	Risque élevé	Risque moyen	Risque faible	Risque très faible
Cas « min_min »	26.39%	34.26%	10.65%	28.70%
Cas « max-max »	56.02%	25.46%	12.04%	6.48%

Tableau 4. Pourcentage de forages de chaque classe de risque dans les deux approches

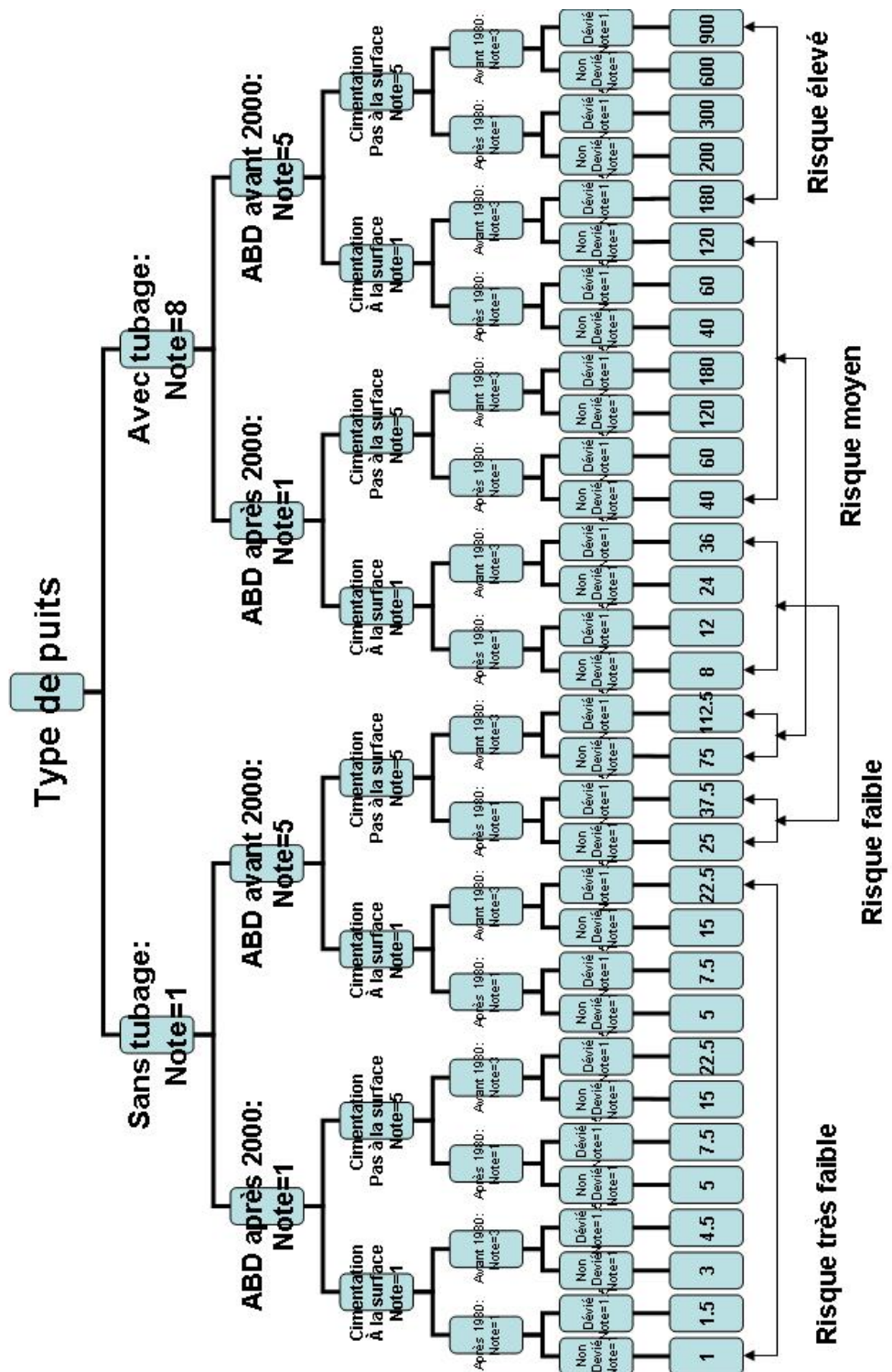


Figure 9. Arbre de risque utilisé dans cette étude afin de bâtir les classes de risque.

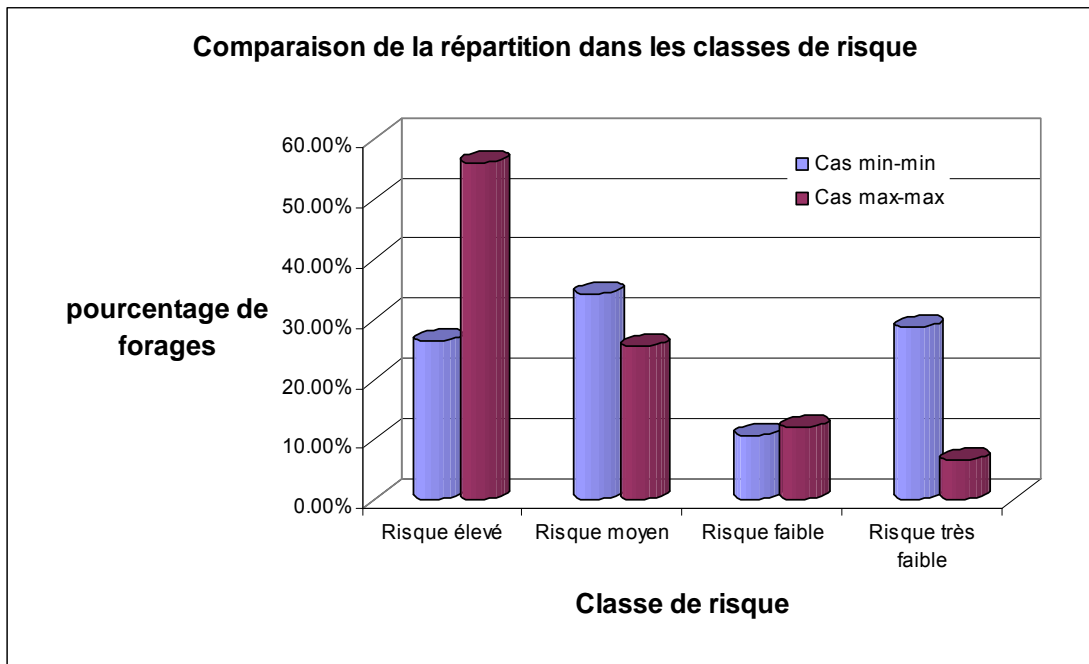


Figure 10. Comparaison des résultats des deux approches sur les classes de risque

Afin d'avoir une vision dans l'espace des résultats obtenus, nous avons cartographié les cas **min_min** (valeur minimale pour les critères ne pouvant pas être évalués en raison de l'absence d'information) et **max_max** (valeur maximale pour les critères ne pouvant pas être évalués). Les cartes obtenues, reportées en Figure 11, mettent en évidence la grande sensibilité de la méthode à l'absence d'information. En effet, dans le cas **min_min**, un stockage au sud-est de la région parisienne semblerait induire un risque de fuite par puits de faible à très faible (seuls quelques puits de risque élevé seraient à prendre en compte), tandis que dans le cas **max_max**, un risque moyen à élevé semblerait prévaloir.

Ces résultats mettent ainsi en évidence l'importance du mode de gestion de l'absence d'information sur le résultat obtenu. En fait, ce résultat s'explique par la méthode de calcul du risque basé sur la multiplication, et non l'addition, des critères. Ainsi, il convient d'être prudent dans l'utilisation des résultats d'une telle classification, et plutôt que d'inscrire chaque puits dans une seule classe de risque, nous préconisons de lui attribuer les deux classes extrêmes associées aux cas « **min_min** » et « **max_max** ».

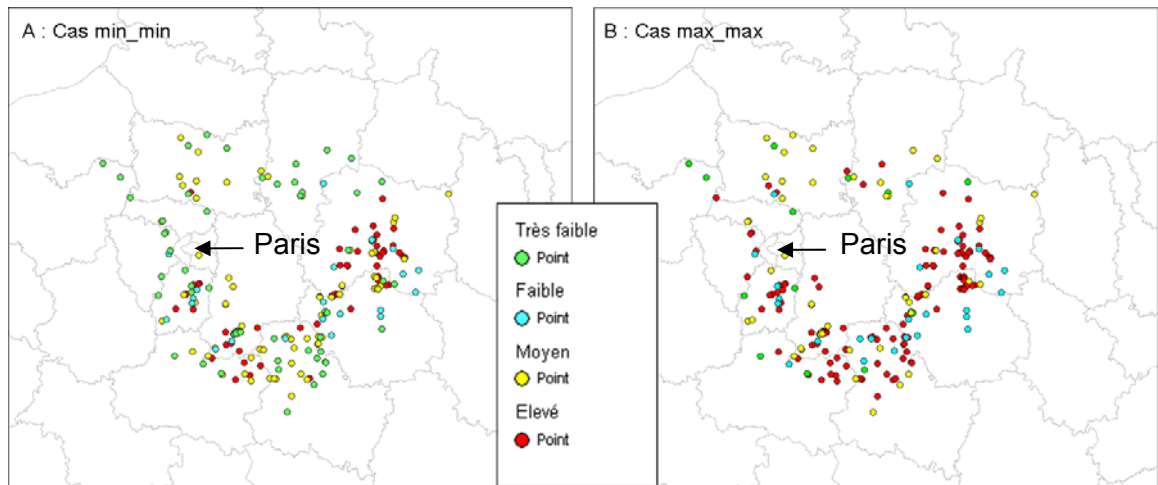


Figure 11. Cartographie des résultats de l'analyse de risque de fuite par les puits abandonnés.

3.5. CONCLUSION

Il est apparu que les informations nécessaires à l'utilisation des critères de Watson et Bachu 2007 sont relativement disponibles dans la base, mais nécessitent cependant certaines hypothèses ou interprétations.

Le risque de fuite a été calculé en deux temps. Dans un premier temps, nous avons recouru à des requêtes SQL pour vérifier les critères. Dans un second temps, un programme Matlab nous a permis de :

- calculer le risque global associé à chaque puits abandonné et pouvant traverser le Dogger,
- déterminer les classes de risque telles que nous les avons définies à partir des critères de risque.

Cette première étude a permis de mettre en évidence l'importance de la méthode de prise en compte des absences d'information sur les cartes de risque de fuite finales. Cette question mériterait donc d'être étudiée de manière plus approfondie dans le futur.

Notons finalement que la présente étude s'est limitée aux critères de fuite de surface mis en évidence dans le cadre de la classification de Watson et Bachu (2007) et quantifiés dans celle de (2008). L'étape suivante serait l'ajout des critères environnementaux tels que décrit dans le §2.6. Pour ce faire, une étude complémentaire visant à identifier les seuils et les coefficients de pondérations associés à ces critères doit être réalisée.

4. Tentative de validation de la classification dans le contexte français

On se propose de vérifier dans ce chapitre si les critères retenus, qui sont basés sur l'étude de Watson et Bachu (2007) rendant compte des occurrences de fuite en Alberta, peuvent rendre compte des occurrences de fuite en France. Pour cela nous avons tenté, à l'image de l'étude canadienne, d'analyser des données de puits à hydrocarbures abandonnés avérés fuyants.

4.1. SOURCES D'INFORMATIONS DISPONIBLES

4.1.1 Sources mentionnant des occurrences de fuites d'hydrocarbures

Rapport BRGM

La point de départ de cette étude a été le rapport BRGM/RP-51312-FR (Vernoux *et al.*, 2002), qui mentionne quatre événements de fuites d'hydrocarbures par des puits abandonnés, ayant eu lieu dans le bassin parisien. Les localités françaises concernées sont les suivantes :

- Chailly (puits CH 46 et CH 48) ;
- Beynes ;
- Saint-Illiers.

Le rapport, dont l'objectif était « d'évaluer les facteurs de risque générés par les forages profonds sur la qualité des aquifères », donne, dans certains cas, quelques éléments utiles concernant :

- les processus d'abandon des puits concernés ;
- la date à laquelle la fuite a été détectée ;
- la localisation dans le puits du (des) point(s) par lequel le fluide s'est échappé ;
- la cause probable de la fuite.

Organismes français

Afin d'avoir de plus de données sur les occurrences de fuite, des organismes publics (DRIRE, Géodéris) ou privés (GDF) concernés par les problèmes de fuite de puits, ont été contactés.

La DRIRE¹² semble en particulier constituer en France la source d'information la plus pertinente concernant les fuites d'hydrocarbures par les puits. Elle a notamment pour rôle de maîtriser les impacts des sites industriels classés ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) sur l'environnement, les biens et les personnes. Ses missions concernent aussi bien les risques accidentels que les rejets environnementaux chroniques. Depuis le 1^{er} décembre 2005, toutes les entreprises productrices de déchets industriels (dangereux ou non dangereux) doivent signaler annuellement les quantités de déchets produits à la DRIRE dont elles dépendent.

Les DRIRE des régions où la densité de puits à hydrocarbures est forte ont été contactées en priorité : DRIRE Île-de-France, DRIRE Aquitaine, DRIRE Alsace.

4.1.2 Données de puits, le guichet « H »

Il existe au BRGM un portail d'accès aux données pétrolières nationales, appelé guichet « H », mis en place par le BRGM. Il s'agit d'une banque de données, en cours de réalisation, permettant la consultation des données publiques de forages pétroliers, acquises sur le territoire national, à terre et en mer.

Les données que le BRGM reçoit proviennent principalement du BEPH (Bureau Exploration-Production des Hydrocarbures) qui était initialement en charge de collecter les données pétrolières nationales.

Le BRGM a pour mission d'archiver les documents papiers, de les numériser et de mettre à disposition la base de données via un portail web spécifique : le guichet H.

A terme, l'objectif du projet Guichet « H » est de transférer au BRGM les données géologiques des 6 500 puits du BEPH et de constituer une base de données complète accessible à partir du portail web.

Les documents existants pour un puits sont de plusieurs natures : rapports de fin de sondage (RFS), rapports d'abandon (ABD), diagraphies, rapports de tests, ... Chacun apporte des informations spécifiques sur les puits.

Cependant, ce dernier étant en cours de réalisation, nous n'avons pas encore accès, au moment de l'étude, à l'ensemble des informations disponibles.

Rapports de fin de sondage (RFS)

Les RFS sont des documents permettant d'avoir accès à un nombre important d'informations relatives à un forage donné. On y trouve généralement l'organisme foreur, la localisation du puits, le type de sondage (exploration, production, ...), l'objectif (recherche d'hydrocarbure, géothermie, ...), l'appareil de forage utilisé, la profondeur finale, des éléments concernant la lithologie, le phasage des opérations, la

¹² Réseau exerçant des missions diverses sous l'autorité conjointe du ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi et du ministère du développement durable.

position des cuvelages et la nature des tests effectués. L'architecture du puits et de la tête de la cimentation, y est généralement reportée. La disponibilité de l'information dans les RFS est hétérogène, il n'existe pas de canevas type pour les rapports de fin de sondage (les informations données dépendent notamment de l'année de forage et de l'opérateur).

Rapports d'abandon (ABD)

Dans le cas d'un puits d'exploration n'ayant pas été fructueux, le rapport de fin de sondage fait aussi office de rapport d'abandon. Si le forage a été fructueux le rapport d'abandon est édité au moment de la fermeture définitive du puits. Les informations apportées par les rapports d'abandon concernent essentiellement la localisation des bouchons et les volumes de ciment utilisés pour les réaliser.

Autres documents

D'autres documents tels que des logs fondamentaux, diagraphies (log de cimentation...), fiches d'analyse d'eau etc., plus rarement disponibles, sont susceptibles d'apporter des informations complémentaires à celles relevées dans les RFS et ABD. Encore une fois la présence et l'exhaustivité de ces informations complémentaires diffèrent selon le puits étudié.

4.2. INFORMATIONS COLLECTEES

4.2.1 Données de fuite

Dans le rapport BRGM précédemment cité, les puits CHAILLY 46 (CH 46) et CHAILLY 48 (CH 48) sont les deux seuls puits ayant été clairement identifiés comme ayant été fuyants. A Beynes et Saint-Illiers, des fuites de gaz ont été détectées par des puits de contrôle dans les aquifères situés au dessus des niveaux réservoirs, mais les puits en cause, au sein du gisement, n'ont pas été déterminés.

Par ailleurs, les nombreuses prises de contact opérées sur 5 semaines auprès d'organismes français ont donné très peu de résultats.

De nombreux échanges par téléphone, e-mail ont abouti à une liste de 13 personnes, reportée en Annexe 5, les plus à même de détenir l'information. Cependant, sur ces 13 personnes directement questionnées, seules 2 ont donné une réponse, les 11 autres ont redirigé vers un autre contact.

Finalement, un seul document écrit, portant sur les résultats d'une étude menée par Gaz de France sur le gisement de Beynes, nous a été transmis. L'étude en question vise à mesurer l'impact des pertes de gaz sur le stockage souterrain de Beynes et n'apporte pas d'information nouvelle sur le(s) puits fuyant(s) du gisement.

Ainsi, aucune réponse obtenue n'apporte de connaissances supplémentaires sur des événements de fuite de puits en France que ceux mentionnés dans le rapport BRGM.

Les puits en France dont la fuite est avérée se réduisent au nombre de 2: Chailly 46 (CH 46) et Chailly 48 (CH 48).

4.2.2 Données d'architecture de puits

Les données des puits CH 46 et CH 48 ont été recherchées sur le serveur internet du guichet H. A ce jour, seul le RFS de CH 48 a pu être consulté. Le RFS de Chailly 46 fait partie des puits dont les données ne sont pas disponibles sur le serveur internet. Le RFS physique semblerait se trouver encore au BEPH à Paris (cependant la personne en charge des documents au BEPH n'a pas pu retrouver le RFS en question, il n'a peut être jamais été communiqué au BEPH). Seul un log fondamental de Chailly 46, n'apportant pas les informations recherchées, est accessible à partir du serveur.

Les puits des gisements de Beynes et de Saint-Illiers ont aussi été recherchés sur le serveur internet du guichet H, bien que l'on ne sache pas quels sont ceux qui fuient. Un seul puits sur l'ensemble des puits de Beynes est répertorié sur le serveur (il s'agit de BEY 101). Des documents sur ce puits, dont le RFS, sont disponibles. De même, un seul puits sur l'ensemble des puits de Saint-Illiers a été trouvé (SIS 01) et des documents sont à disposition. Soulignons que dans l'hypothèse où les puits fuyants de ces gisements seraient identifiés, le serveur internet ne pourrait pas pour l'instant apporter d'informations sur les puits, faute d'indisponibilité des documents.

Le tableau suivant récapitule les données trouvées sur les puits.

Puits	Occurrence de fuite	Données dans le rapport BRGM			RFS	Procédures d'abandon détaillées
		Date de la fuite dans le puits ou au sein du gisement	Localisation de la fuite	Raison invoquée de la fuite		
Chailly 46	oui	○	○	○	●	○
Chailly 48	oui	○	○	○	○	○
Saint-Illiers 1	?	○	●	○	○	○
Beynes 101	?	○	●	○	○	○

Tableau 5: Disponibilité des données de puits

○ : disponibilité

● : absence de disponibilité

4.3. CONCLUSION

L'étude conduite ne nous a permis d'identifier qu'un seul puits (CH 48) pour lequel on dispose à la fois de la connaissance d'une fuite avérée et de documents détaillés sur l'architecture du puits.

Au regard des difficultés rencontrées pour obtenir des informations sur les occurrences de fuites en France, il apparaît impossible de valider la classification suivant la méthode retenue dans cette étude. Il est important de souligner que les personnes contactées, supposées être les plus à même de connaître des réponses, n'ont pas cherché à cacher une information qu'elles détenaient, mais n'avaient tout simplement pas connaissance de fuites de puits ayant eu lieu. Cette étude permet ainsi de mettre en évidence soit une totale absence de fuite des puits français, soit un véritable problème quant à l'accessibilité de la donnée « fuite de puits » contrairement au Canada où les données sont abondantes et semblent être disponibles sous forme de base de données.

Afin de palier ce manque de donnée, l'autre option, non réalisée dans le cadre d'*Integmeca09*, serait de confronter la note obtenue par la classification aux mesures indirectes d'étanchéité (CBL, USIT/IS ? Diametreur, ... cf. §2.4.2), pour l'ensemble des puits disposant ce type de renseignement.

5. Conclusion

Le but de ce travail était de servir de socle à l'établissement d'une classification de puits abandonnés, vis-à-vis du risque de remontée du CO₂ injecté, applicable au contexte Français.

Sur la base d'une étude bibliographique, nous avons bâti cette classification en adaptant au contexte français celle initialement développée par Watson et Bachu, (2007,2008) pour le contexte canadien. Les critères retenus ont été :

- le type de puits (avec/sans cuvelage interceptant l'aquifère cible du stockage), la date d'abandon (avant/après la réglementation française de 2000),
- la cimentation (atteignant ou non la surface),
- la déviation, et la date du forage (avant/après la réglementation française de 1980),

auxquels, nous avons proposé d'ajouter, afin de prendre en compte les éventuels modifications de l'intégrité du puits dans le temps des critères liés à l'environnement :

- composition chimique de fluide saturant initialement l'aquifère,
- type de roche intersectée par le puits,
- température et pression *in-situ*,

L'impact et les seuils des critères « environnementaux » restent encore à estimer. Il n'ont donc pas été pris en compte dans la suite de l'étude.

L'étape suivante a été d'évaluer l'applicabilité de cette classification à des puits à hydrocarbures abandonnés du bassin de Paris. Afin d'étudier l'impact du manque d'information sur la classe de risque associée au puits, nous avons considérés différents cas, allant du plus préjudiciable considérant qu'un critère ne pouvant pas être vérifié en raison d'une carence d'information est défaillant, au cas le plus optimiste pour lequel les critères non vérifiables sont exclus du calcul de risque.

Dans le cas le plus préjudiciable, environ 55% des forages atteignant le Dogger ont un risque de fuite en surface très élevé. Dans le cas le plus optimiste, cette valeur passe à environ 25%. La cartographie de ces deux cas extrêmes corrobore cette incertitude en montrant qu'une même zone peut présenter un risque de fuite allant de faible à élevé suivant l'approche retenue.

Ainsi, un résultat important de cette étude est la mise en évidence de l'importance de la gestion de l'absence d'information sur le résultat obtenu.

Il convient ainsi d'être prudent quant à l'utilisation des résultats d'une telle classification, et plutôt que d'inscrire chaque puits dans une seule classe de risque, nous préconisons de présenter des cartes de risque de fuite par les puits à *maxima* et à *minima*. Il serait ainsi laissé au décideur, en fonction de ses connaissances sur le bassin étudié, de choisir la carte la plus appropriée.

Nous avons enfin tenté de valider cette classification en la confrontant à des événements de fuite de puits d'hydrocarbure ayant eu lieu en France. Cette action a nécessité la recherche d'occurrences de fuites en France auprès d'organismes concernés par les problèmes de fuite de puits. Cependant, après avoir contacté une vingtaine de personnes auprès des instances françaises en charge de la gestion du sous-sol, aucune donnée significative de fuites de puits n'a pu être collectée. Cette étude a donc mis en évidence que la donnée « fuite de puits » est mal connue et/ou peu accessible en France contrairement au Canada où une agence gouvernementale recense l'ensemble des fuites de puits.

Afin de palier ce manque de donnée, l'autre option, non réalisée dans le cadre d'*Integmeca09*, serait de confronter la note obtenue par la classification aux mesures indirectes d'étanchéité (CBL, USIT/IS ? Diamètre, ... cf. §2.4.2), pour l'ensemble des puits disposant ce type de renseignement.

6. Bibliographie

Allahverdi A., Skvara F. (2000), Acidic Corrosion of Hydrates Cement Based Materials (part 1). *Ceramics – Silikaty* (44), 114-120.

Benson S., Cook P. et al. (2005) Chapter 5: Underground Geological Storage, *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*.

Bouc O. (2008) Construction des scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO₂ : méthode et application. *BRGM/RP-56592-FR*, 108 p., 23. ill., 3 ann.

Bredehoeft J.D., Papadopoulos S.S. (1980) A Method for Determining the Hydraulic Properties of Tight Formations, *Water Resources Research* (16), 233-238.

Carey J.W., Wigand M., Chipera S., Woldegabriel G., Pawar R., Lichtner P.C., Wehner S., Raines M., Guthrie G.D. (2007) Analysis and performance of oil well cement with 30 years of CO₂ exposure from SACROC Unit, Texas, USA, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1. 75- 85.

Chaussadent T., (1999) Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé. *Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*.

Cimbeton, Béton armé d'inox le choix de la durée, *collection technique cimbéton*

Cimbeton, Bétons et ouvrages d'art, la durabilité des bétons, *collection technique cimbéton*

Crain E.R., (2005) Cement Integrity Logs, in *Crain's Petrophysical Handbook*, Chapter 50.

Duguid A., Tombari J. (2007) Technologies for Measuring Well Integrity in a CO₂ field , *6th annual conference on carbon capture and sequestration, DOE/NETL*

Economides M. J. (1990) Implications of Cementing on Well Performance, *dans Well Cementing, Nelson E.B. editor*, 6p.

Fabrizi A., Jacquemet N., Seyedi D. (2009a) Modelling of the chemio-mechanical behaviour of a wellbore cement plug in a context of CO₂ storage, *Fourth Biot Conference, NY, USA*, 189-195.

Fabrizi A., Corvisier J., Schubnel A., Brunet F., Goffé B., Rimmelé G., Barlet-Gouédard V. (2009b) Effect of carbonation on the hydro-mechanical properties of Portland cements, *Cement and Concrete Research* (39) 1156–1163

Fields S.A., Martin M.M. (1997) The Plugging Process: Securing Old Gas & Oil Wells for the Protection of the Environment, *Proceedings of the Decommissioning Workshop*.

Gao B., Gao D. (2006) Shearing Damage of Casing-Cement Sheath Interface from Temperature Changing in Wellbore, *Progress in Safety Science & Technology* (6) 2443-2447.

Garaffa L. -H. (2009) Evaluation du potentiel de fuite par les puits à hydrocarbure abandonnés. *Rapport de stage, BRGM*

Gasda S.E., Bachu S., Celia M.A. (2004) Spatial characterisation of the location of potentially leaky wells penetrating a deep saline aquifer in a mature sedimentary basin, *Environmental Geology* (46). 707-720.

Gasda S.E., Nordbotten J.M., Celia M.A. (2008) Determining effective wellbore permeability from a field pressure test: a numerical analysis of detection limits, *Environmental Geology* (54). 1207-1215.

Guo B., Lyons W. C., Ghaleb A. (2007) Petroleum production engineering, *Gulf Publishing*

ISO 10426-1 (2005) Industries du pétrole et du gaz naturel – Ciments et matériaux pour la cimentation des puits – Partie 1 Spécifications – Norme internationale deuxième édition.

Jacquemet N., Pironon J., Saint-Marc J. (2008) - Mineralogical changes of a well cement in various H₂S-CO₂(-brine) fluids at high pressure and temperature. *Environmental Science and Technology* (42) 282-288.

Jutten M., Morris S. L. (1990) Chapter 16 - Cement Job Evaluation, *Well Cementing*, Nelson E.B. editor, 44p.

Journal officiel (2003) Arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n°96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondages, forage, création de puits ou d'ouvrage

Khodadadi A., (2008) Investigation of gas migration in Khangiran Wells, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* (24)

Lécolier E., Rivereau A., Ferrer N., Audibert A., Longaygue X. (2006), Durability of Oilwell Cement Formulations Aged in H₂S-Containing Fluids, *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*.

Loizzo M., (2008), Advances in cement interpretation results from CO₂SINK and CO₂CRC, IEAGHG 4th Wellbore Integrity Network Meeting, Paris.

Mainguy M., Longuemare P., Audibert A., Lécolier E. (2007) Analyzing the Risk of Well Plug Failure after Abandonment, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 62(3)

Meyer J. P., (2007) Summary of Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery (CO₂EOR) Injection Well Technology, Background Report, American Petroleum Institute.

Nordbotten J.M., Kavetski D., Celia M.A., Bachu S. (2009) Model for CO₂ leakage including geological layers and multiple leaky wells, *Environmental Science & Technology* (43).

Oil and Gas Commission (2008) British Columbia Surface Casing Vent Flow/Gas Migration, Testing, Reporting and Repair Requirements, 10 p.

Orlic B. (2008) Some Geomechanical Aspect of Geological CO₂ Sequestration, 12th International Conférence of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics.

Parcevaux P., Rae P., Drecq P. (1990), Prevention of Annular Gas Migration, dans *Well Cementing*, Nelson E.B. editor, 22p. RGM Décembre 2007

Patroni J.M. (2007) Lifetime of a natural Gas Storage Well Assessment of Well-Field Maintenance Cost, , *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 62(3)

Peng S., Fu J., Zhang J. (2007) Borehole casing failure analysis in unconsolidated formations: a case study, *Journal of Petroleum Science & Engineering* 59, pp. 226-238.

Perrin D. (2000) *Well Completion and Servicing*, Technip.

Piot B. (2002) La cimentation: un mal nécessaire ou un nouvel outil dans l'architecture des puits. Avancées technologiques au début du XXI siècle, Conférence AFTP/SPE « Cimentation des puits : évolution de la technologie ».

Pironon J., Giraud J.B., Blanc P., Burnol A., Jacquemet N., Rohmer J., Gerick E., Pichery T., Fillacier S., Munier G., Lagneau V. (2007) Intégrité des Puits, *Rapport final du volet 6 de l'ANR GEOCARBONE Intégrité*.

Poupard O., Giry E. (2009) CO₂ Storage – Managing the Risk of Wellbore Leakage over Long Timescales, *5th Meeting of the Wellbore Integrity Network*, Alberta, Canada.

Schlumberger (2009) Oilfield Glossary, <http://www.glossary.oilfield.slb.com>

Shryock S.H., Smith D.K. (1981) Geothermal Cementing – The State of Art, Proceedings of the international conference on geothermal drilling and completion technology, Albuquerque, NM, USA,

Szymanski A.L., Le Nir M. (2007) Synthèse hydrogéologiques des aquifères situés – Sud Paris. *Rapport final*, BRGM

Vernoux J. F., Degouy M., Machard de Gramont H., Galin R. (2002) Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eaux souterraines du bassin Seine-Normandie. *Rapport final BRGM/RP-51312-FR*.

Vernoux J. F., Bretteville V., Denis L., Fabris H., Pointet T., Souadi T., Vigouroux P. (2003) - Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie. *Rapport final BRGM/RP-52102-FR*.

Viswanathan H.S., Pawar R.J., Stauffer P.H. et al., (2008) Development of a hybrid Process and System Model for the Assessment of Wellbore Leakage at a Geologic CO Sequestration Site, *Environmental Science & Technology* 42(19):7280-7286.

Watson T.L., Bachu S. (2007) Evaluation of the potential for gas and CO₂ leakage along wellbores, *SPE* 106817

Watson T.L., Bachu S. (2008) Identification of Wells with high CO₂-Leakage Potential in Mature Oil Fields Developed for CO₂-Enhanced Oil Recovery, *SPE* 112924

Wertz F., Audigane P., Bouc O. (2009) CO₂ -Thermodynamic Model in a Leaking Well, *Energy Procedia* 1.

Wojtanowics A.K., Manowski W., Nishikawa S. (2000) Gas Flow in Wells After Cementing, US Department of Interior, Mineral Management Service – Baton Rouge, Louisiana.

Annexe 1 : Processus physico-chimique d'altération des ciments de puits

Le but de cette annexe est de présenter un aperçu des processus d'altération d'un ciment de puits en milieu agressif, qui sont principalement les milieux acides et salins (**ACI committee report – Chapter 2**).

Notons cependant que l'altération dépend de la minéralogie du ciment sollicité (**Lea, 1998**). Cette étude se limite aux ciments de puits classique, composés essentiellement de Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou CH) et de silicates de calcium hydratés ($(\text{CaO})_x(\text{SiO})_y(\text{H}_2\text{O})_z$, ou C-S-H).

ATTAQUE PAR LES SELS

Les attaques par les sels sont essentiellement dues à la présence de sulfates dans la saumure saturant la couche aquifère.

Les sulfates réagissent avec les matériaux cimentaires selon deux réactions chimiques :

1. combinaison des ions sulfate contenus dans l'eau agressive avec les ions calcium (libérés durant l'hydratation du ciment) pour former du gypse ;
2. combinaison des ions sulfates et aluminates de calcium hydratés pour former de l'ettringite.

Dans les deux cas, les phases secondaires formées (gypse et ettringite) peuvent causer une expansion, voire un endommagement de la matrice cimentaire.

L'expansion qualifie le phénomène d'accroissement de volume de la matrice dû à la néoformation de minéraux dont le volume molaire est plus grand que ceux qu'ils remplacent. Cette altération physique peut augmenter d'autant plus l'altération chimique : l'expansion peut provoquer l'apparition de micro-fissures qui augmentent la porosité et donc la pénétration des espèces réactives au sein du ciment et qui fait chuter les propriétés mécaniques du ciment.

ATTAQUE ACIDE

L'introduction d'un milieu acide (gaz acides H_2S , CO_2 ... dissous dans l'eau) au sein d'un milieu cimentaire basique (pH normalement supérieur à 12,5) provoque un déséquilibre thermo-chimique entre le fluide et les minéraux.

Les conséquences de ce déséquilibre sont classiquement la dissolution de la portlandite et la décalcification des silicates de calcium. Ces réactions entraînent l'augmentation des paramètres hydrauliques (porosité, perméabilité) et la diminution de la résistance du matériau (**Lécolier, 2006**).

CAS PARTICULIER DE LA CARBONATATION

Lorsque CO_2 se trouve en solution, environ 1% du CO_2 réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique H_2CO_3 (Nelson, 1990) pouvant ensuite réagir avec la matrice cimentaire. Cette réaction se nomme la carbonatation. Elle se décompose en deux étapes successives :

- lixiviation des minéraux de la matrice cimentaire par les protons produits par dissolution-dissociation du CO_2 dans l'eau. Ceci conduit notamment à la libération d'ions Ca^{2+} ;
- combinaison entre le calcium ainsi libéré avec les ions CO_3^{2-} de l'acide pour former du carbonate de calcium solide

Par ailleurs si le CO_2 est en excès dans le milieu, la calcite néoformée peut être transformée en bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), très soluble dans l'eau. Il en découle un accroissement de la porosité matricielle. Simultanément, le bicarbonate de calcium peut réagir avec la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour reformer de la calcite et de l'eau.

L'intensité de l'attaque chimique dépend de la qualité du ciment, de la concentration en dioxyde de carbone et surtout des conditions aux expositions extérieures (**Allahverdi, 2000**). Ainsi, les résultats de carbonatation peuvent être avantageux ou défavorables.

En effet, les carbonates étant généralement moins denses, plus rigides et plus résistants que les minéraux cimentaires qu'ils remplacent, la carbonatation a, dans un premier temps, tendance à réduire la porosité et la perméabilité, ainsi qu'à augmenter les caractéristiques mécaniques du ciment. Cependant, une carbonatation continue peut causer une réduction de l'alcalinité de la pâte de ciment (jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 5) ce qui peut avoir pour conséquence la lixiviation du matériau. De plus, sous ces conditions, le ciment ne remplit son rôle de passivation de l'acier du cuvelage (voir § Chimie des aciers).

Annexe 2 : Corrosion des aciers

Dans des conditions normales, un acier enrobé dans un matériau cimentaire est naturellement protégé des risques de corrosion par un phénomène de passivation. Ce dernier résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (dite de passivation).

Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant l'acier. La présence de Portlandite dans le ciment induit un pH élevé (de l'ordre de 12 à 13) de sa solution interstitielle. Le cuvelage est protégé tant qu'il se trouve dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5.

Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des cuvelages en acier :

- la carbonatation du ciment (annulaire et/ou bouchon) par adsorption du CO_2 ;
- la pénétration des ions chlorures jusqu'au niveau du cuvelage.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du ciment et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs.

LA CARBONATATION

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la dissolution de la Portlandite du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe la réaction d'oxydation à la surface du cuvelage.

L'ACTION DES CHLORURES

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du ciment et atteindre le cuvelage. Les conséquences sont la dépassivation et la corrosion de l'acier par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydo-réduction :

Métal → ions métalliques Mn^+ + n électrons

Cette réaction est d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisées à toute la surface (corrosion généralisée par piqûres).

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau de l'acier atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5% par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le ciment est carbonaté.

EFFETS DE LA CORROSION

Le développement de la corrosion de l'acier peut provoquer par gonflement une poussée au vide sur le ciment d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le ciment qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction). Les conséquences pourraient être des éclatements localisés et des formations de fissures, pouvant être préjudiciables pour l'étanchéité du puits.

Annexe 3 : Résultats du calcul du risque de fuite en surface

Remarque : Lorsque la valeur attribuée est égale à zéro, cela signifie que ce critère n'est pas vérifié pour le puits concerné. Le cas sans prise en compte de l'absence d'informations est donné ici.

	sans description	avec	sans	abandonné	abandonné	sans date	cimentation	pas cimentation	puits	puits	forage	forage	RISQUE
	Cuvelage	cuvelage	cuvelage	avant 2000	après 2000	abandon	à la surface	à la surface	devié	non dévie	avant 1980	après 1980	forage
Forages/coef	1.0	8.0	1.0	5.0	1.0	1.0	1.0	5.0	1.5	1.0	3.0	1.0	
01035X0001	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
01056X0003	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	3.0
01056X0160	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
01057X0012	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
01062X0001	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
01273X0001	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
01282X0007	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
01294X0014	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
01302X0009	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
01307X0022	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
01307X0025	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	3.0
01527X0129	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	8.0

01527X0129B	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
01527X0130	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
01528X0101	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5
01534X0007	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	3.0
01585X0073	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
01823X0077	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5
01828X0118	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
01828X0146	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
01836A0445	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.0	12.0
01836A0446	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.0	12.0
01837D0267	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.0	60.0
01877X0040	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
01878X0023	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
01878X0027	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
01883X0018	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
01883X0019	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
01885X0035	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
01887X0021	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
01887X0035	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
02187X0042	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5

Integmeca09-Intégrité des puits

02196X0089	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5
02197X0138	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02197X0139	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
02197X0171	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02198X0026	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	3.0
02207X0063	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
02207X0064	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
02233X0021	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02234X0035	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02234X0036	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02237X0025	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02237X0027	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
02243X0026	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02572X0031	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	3.0	0.0	22.5
02572X0050	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
02572X0055	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
02573X0067	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02573X0069	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02575X0049	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02576X0052	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0

Integmecca09-Intégrité des puits

02577X0084	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02577X0087	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5
02586X0006	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	600.0
02586X0014	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
02611X0004	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02611X0005	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	600.0
02612X1022	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
02612X1023	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
02613X0009	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02613X0059	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02613X0063	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
02615X0003	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
02615X0005	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	24.0
02615X0007	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	600.0
02615X0013	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	3.0
02616X0001	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02923X0043	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
02924X0001	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0	3.0	0.0	36.0
02944X0001	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02946X0109	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0

Integmeca09-Intégrité des puits

02947X0001	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0002	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
02947X0004	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02947X0005	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0006	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0007	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02947X0008	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0009	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0010	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0012	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0013	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0078	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	3.0	0.0	22.5
02947X0111	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02947X0124	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
02948X0001	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
02948X0002	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02948X0003	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02948X0082	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
02948X0091	1.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
02952X0159	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0

Integmecca09-Intégrité des puits

02958X0159	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
02964X0017	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
02965X0005	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
02965X0074	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
02965X0075	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
02965X0076	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	60.0
02967X0004	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	600.0
02967X0015	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	60.0
02971X0008	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
03281X0011	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
03283X0065	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	7.5
03288X0092	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
03288X1001	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
03291X0003	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	24.0
03291X0004	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
03291X0080	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
03292X0041	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
03293X0121	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
03294X0086	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
03295X1020	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	600.0

Integmeca09-Intégrité des puits

03298X1081	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
03302X1022	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	75.0
03302X1051	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
03305X0070	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
03306X0082	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
03312X0005	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
03314X1025	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	60.0
03652X0015	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	15.0
03652X0158	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
03653X0165	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
03661X0169	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
14-3510	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	300.0
147_DHYMA	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	3.0	0.0	120.0
303_DHYMA	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	37.5
305_DHYMA	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
410_DHYMA	0.0	8.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	200.0
412_DHYMA	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	5.0
514_DHYMA	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.0	12.0
514_DHYMA A	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.0	1.5

Integmeca09-Intégrité des puits

535_DHYMA	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	25.0
537_DHYMA	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	1.5	0.0	0.0	1.0	60.0
600_DHYMA	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0
688_DHYMA	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	0.0	1.0	40.0

Annexe 4 : Résultats concernant les classes de risque

➤ Cas sans prise en compte de l'absence d'information

Risque élevé	Risque moyen	Risque faible	risque très faible
01272X0001	00801X0001	01828X0146	00804X0001
01328X0032	00807X0003	01883X0018	00806X0003
01585X0073	01035X0001	02254X0041	00816X0001
01587X0056	01056X0160	02573X0067	00846X0003
01877X0040	01057X0012	02573X0069	01004X0001
01883X0017	01271X0001	02576X0052	01016X0002
01883X0019	01273X0001	02615X0005	01056X0003
01883X0020	01277X0002	02615X0013	01062X0001
01885X0035	01282X0007	02628X0017	01081X0024
01887X0021	01307X0022	02633X0026	01258X0002
01887X0036	01348X0009	02924X0001	01276X0053
01888X0020	01527X0129B	02947X0124	01294X0014
01888X0021	01527X0130	02948X0091	01302X0009
01888X0027	01595X0021	02965X0075	01307X0025
01895X0012	01595X0029	02973X0009	01324X0001
01896X0026	01837D0267	02976X0021	01325X0033
01896X0029	01878X0027	03291X0003	01527X0129
02197X0138	01887X0035	148_DHYMA	01528X0101
02197X0139	02207X0063	303_DHYMA	01534X0007
02197X0171	02207X0064	305_DHYMA	01823X0077
02233X0021	02237X0027	472_DHYMA	01828X0118
02234X0035	02247X0014	535_DHYMA	01836A0445
02234X0036	02247X0015	68_DHYMA	01836A0446
02237X0025	02572X0055		01878X0023
02243X0026	02577X0087		02187X0042
02247X0016	02586X0014		02196X0089
02247X0017	02611X0004		02198X0026
02247X0022	02612X1023		02248X0011
02252X0011	02613X0009		02255X0008
02255X1001	02615X0003		02563X0002
02572X0050	02623X0011		02572X0031
02575X0049	02623X0021		02615X0004
02577X0084	02624X0025		02616X0001

02586X0006	02923X0043		02947X0001
02611X0005	02944X0001		02947X0005
02612X1022	02947X0002		02947X0006
02613X0059	02947X0004		02947X0008
02613X0063	02947X0007		02947X0009
02615X0007	02948X0002		02947X0010
02618X0002	02948X0003		02947X0012
02624X0026	02948X0082		02947X0013
02946X0109	02965X0005		02947X0078
02952X0159	02965X0074		02947X0111
02964X0017	02965X0076		02948X0001
02967X0004	02967X0015		02958X0159
03292X0041	02971X0008		02988X0035
03293X0121	02975X0016		03281X0011
03294X0086	03283X0065		03288X0092
03295X1020	03288X1001		03308X0009
03298X1081	03291X0004		03313X0026
03306X0082	03291X0080		03318X0038
03653X0165	03302X1022		03321X1015
03661X0169	03302X1051		03325X1026
03674X0005	03305X0070		03652X0015
14-3510	03312X0005		03664X1010
307_DHYMA	03314X1024		03678X0010
410_DHYMA	03314X1025		03681X0001
	03316X0038		04025X0087
	03325X1025		412_DHYMAA
	03652X0158		412_DHYMA
	03661X0105		514_DHYMA
	03663X0002		514_DHYMAA
	03664X1025		
	03673X0002		
	04021X0053		
	130_DHYMA		
	147_DHYMA		
	417_DHYMA		
	521_DHYMA		
	532_DHYMA		
	537_DHYMA		
	540_DHYMA		
	600_DHYMA		
	688_DHYMA		

- Cas avec prise en compte de l'absence d'informations "au max"

Risque élevé	Risque moyen	Risque faible	Risque très faible
01056X0160	00801X0001	01276X0053	00806X0003
01062X0001	00804X0001	01828X0146	01004X0001
01258X0002	00807X0003	01883X0018	01016X0002
01271X0001	00816X0001	02196X0089	01056X0003
01272X0001	00846X0003	02254X0041	01307X0025
01294X0014	01035X0001	02573X0069	01324X0001
01325X0033	01057X0012	02576X0052	01534X0007
01328X0032	01081X0024	02628X0017	02198X0026
01528X0101	01273X0001	02633X0026	02563X0002
01585X0073	01277X0002	02947X0124	02615X0004
01587X0056	01282X0007	02958X0159	02616X0001
01823X0077	01302X0009	02965X0075	03281X0011
01828X0118	01307X0022	02973X0009	03652X0015
01877X0040	01348X0009	02976X0021	03664X1010
01878X0023	01527X0129	02988X0035	
01883X0017	01527X0129B	03288X0092	
01883X0019	01527X0130	03308X0009	
01883X0020	01595X0021	03313X0026	
01885X0035	01595X0029	148_DHYMA	
01887X0021	01836A0445	303_DHYMA	
01887X0035	01836A0446	305_DHYMA	
01887X0036	01837D0267	412_DHYMAA	
01888X0020	01878X0027	412_DHYMA	
01888X0021	02248X0011	472_DHYMA	
01888X0027	02255X0008	535_DHYMA	
01895X0012	02586X0014	68_DHYMA	
01896X0026	02611X0004		
01896X0029	02613X0009		
02187X0042	02615X0005		
02197X0138	02615X0013		
02197X0139	02923X0043		
02197X0171	02924X0001		
02207X0063	02944X0001		
02207X0064	02947X0001		
02233X0021	02947X0005		
02234X0035	02947X0006		
02234X0036	02947X0008		
02237X0025	02947X0009		
02237X0027	02947X0010		
02243X0026	02947X0012		
02247X0014	02947X0013		
02247X0015	02947X0078		
02247X0016	02947X0111		
02247X0017	03288X1001		

02247X0022	03291X0003		
02252X0011	03291X0004		
02255X1001	03291X0080		
02572X0031	03302X1022		
02572X0050	03312X0005		
02572X0055	03663X0002		
02573X0067	03678X0010		
02575X0049	03681X0001		
02577X0084	04025X0087		
02577X0087	514_DHYMA		
02586X0006	514_DHYMAA		
02611X0005			
02612X1022			
02612X1023			
02613X0059			
02613X0063			
02615X0003			
02615X0007			
02618X0002			
02623X0011			
02623X0021			
02624X0025			
02624X0026			
02946X0109			
02947X0002			
02947X0004			
02947X0007			
02948X0001			
02948X0002			
02948X0003			
02948X0082			
02948X0091			
02952X0159			
02964X0017			
02965X0005			
02965X0074			
02965X0076			
02967X0004			
02967X0015			
02971X0008			
02975X0016			
03283X0065			
03292X0041			
03293X0121			
03294X0086			
03295X1020			

03298X1081			
03302X1051			
03305X0070			
03306X0082			
03314X1024			
03314X1025			
03316X0038			
03318X0038			
03321X1015			
03325X1025			
03325X1026			
03652X0158			
03653X0165			
03661X0105			
03661X0169			
03664X1025			
03673X0002			
03674X0005			
04021X0053			
130_DHYMA			
14-3510			
147_DHYMA			
307_DHYMA			
410_DHYMA			
417_DHYMA			
521_DHYMA			
532_DHYMA			
537_DHYMA			
540_DHYMA			
600_DHYMA			
688_DHYMA			

Annexe 5 : : Liste des personnes contactées et résultats obtenus

Organisme contacté	Nom de la personne contactée	Adresse e-mail	Téléphone	Information recueillie
DRIRE Alsace	Jérôme Pochon	Jerome.Pochon@industrie.gouv.fr	03 88 25 92 80	aucune
DRIRE Aquitaine	Didier Le Meur	didier.le-meur@industrie.gouv.fr	05 56 00 04 00	aucune
DRIRE Aquitaine	Bernard Le Gorec	bernard.le-gorec@industrie.gouv.fr		aucune
DRIRE Ile-de-France	Florent Sauvignet	florent.sovignet@industrie.gouv.fr		aucune
DRIRE Ile-de-France	Laurence Balmes	laurence.balmes@industrie.gouv.fr		aucune
DRIRE Ile-de-France	Michel Van der Boggard	michel.vandenbogaard@industrie.gouv.fr		Un document transmis*
DRIRE Ile-de-France	Oliver David	olivier.david@industrie.gouv.fr		aucune
DRIRE Centre	Jean-Pierre Richard	jean-pierre.richard@industrie.gouv.fr		aucune
DRIRE Centre	Anne-Emilie Larquet	Anne-emilie.Larquet@industrie.gouv.fr	02 38 41 76 32	aucune
BEPH	Philippe Ringalle	philippe.ringalle@developpement-durable.gouv.fr		aucune
GDF	Sandra Moro	sandra.moro@storengy.com		aucune
Géodéris	Marion Kimmel	marion.kimmel@geoderis.fr		aucune
Géodéris	Luc Vuidart	luc.vuidart@geoderis.fr		aucune

* Il s'agit d'un rapport présenté par la DRIRE au CODERST (Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Sanitaires et Technologiques) des Yvelines fin 2007 concernant les fuites sur les puits du stockage de gaz de Beynes



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