

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Hydrofracturation de puits résidentiels

Guide technique

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974
Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Ministère de l'Environnement
et de la Lutte contre les changements climatiques
675, boul. René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5V7
Téléphone : 418 521-3848

Ou

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2020
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-87962-6 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2020

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	iv
Remerciements	v
Glossaire	vi
1. Introduction	1
2. À qui s'adresse le guide?	1
3. Pourquoi développer des fractures dans le roc d'un puits résidentiel?	1
4. Méthodes de fracturation non recommandées	2
5. Qu'est-ce que l'hydrofracturation?	2
5.1 Le concept	2
5.2 La science derrière le concept	4
5.2.1 La distribution spatiale des contraintes dans le roc	4
5.2.2 Les caractéristiques du socle rocheux	6
5.2.3 À quel moment une fracture se forme-t-elle dans le roc?	10
5.2.4 Comment se comporte le roc en cours de travaux d'hydrofracturation?	10
6. Exigences règlementaires	11
7. Procédure d'hydrofracturation	12
7.1 Évaluer le potentiel d'un puits soumis à l'hydrofracturation	12
7.2 Distances sécuritaires par rapport aux infrastructures	13
7.3 Préparation de l'ouvrage et des équipements requis	13
7.4 Sélection du type d'obturateur	13
7.5 Positionnement des obturateurs	14
7.6 Agents de soutènement	15
7.7 Évaluation de la performance des travaux d'hydrofracturation	17

8. Rapport de travaux d'hydrofracturation	17
9. Références bibliographiques	18
Annexe	20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Valeurs typiques de résistance en traction selon la nature du roc.	9
--	---

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Distinction entre l'hydrofracturation par a) la méthode standard à obturateur unique et b) la méthode de zone ciblée à deux obturateurs.	4
Figure 2 - Distinction entre les contraintes normales, les contraintes de cisaillement et les contraintes principales.	5
Figure 3 - Distribution des contraintes dans le socle rocheux à faible profondeur (< 1 000 m) (inspirée de Comeskey et Smith, 2015).	6
Figure 4 - Création d'une fracture sur un cylindre de roc dans le cadre d'un essai de traction.	7
Figure 5 - Réponse typique d'un échantillon de roc lors d'un essai de traction.	8
Figure 6 - Deux types de comportements associés à la pression d'injection (inspirée de Williamson et Woolley, 1980).	11
Figure 7 - Types d'obturateurs et profondeurs d'installation recommandées.	15

REMERCIEMENTS

La Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) tient à remercier le Département des génies civil, géologique et minier de l'École Polytechnique de Montréal pour son apport à la revue de littérature réalisée en amont de la rédaction du présent guide. De plus, la Direction tient à souligner l'apport de plusieurs collaborateurs, pour leurs commentaires constructifs, sans qui la présente version du guide technique sur l'hydrofracturation des puits résidentiels n'aurait pu être publiée :

École Polytechnique de Montréal

Abtin Jahanbakhshzadeh (ing. jr., Ph. D.)

Qiangui Zhang (Ph. D., professeur invité)

Li Li (ing., Ph. D.)

Richelieu Hydrogéologie inc.

Yves Leblanc (ing., M. Sc. en hydrogéologie)

Association des entrepreneurs en forage du Québec (AEFQ)

Association des propriétaires de machinerie lourde du Québec (APMLQ)

GLOSSAIRE

Altération	Modification des propriétés physicochimiques des minéraux, et donc des roches, par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines et les eaux thermales (Foucault, 1995).
Aquifère	Unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, d'où l'on peut extraire de l'eau par pompage de façon économique (Chapuis, 2007).
Calcaire	Roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50 % de calcite (CaCO ₃) (Foucault, 1995).
Cisaillement direct	Résistance d'un plan (fracture) à engendrer un déplacement sous l'effet d'une force normale constante et d'une force tangentielle croissante.
Coefficient de Poisson	Rapport entre le rétrécissement transversal et l'allongement longitudinal de l'échantillon soumis à un essai de traction.
Clivage	Aptitude pour un minéral ou pour une roche à se fendre facilement suivant une famille de plans parallèles bien définis (Foucault, 1995).
Dolomite	Roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50 % de carbonates, dont la moitié au moins est sous forme de dolomie ((Ca, Mg) CO ₃) ₂) (Foucault, 1995).
Gneissosité	Texture de roches métamorphiques montrant une alternance de bandes foncées (minéraux ferromagnésiens) et claires (quartz, feldspaths).
Grès	Roche sédimentaire détritique terrigène composée à 85 % de grains de quartz plus ou moins arrondis de 62,5 µm à 2 mm (Foucault, 1995).
Perméabilité	Propriété d'un sol, d'un rocher ou d'un matériau qui se laisse traverser par un fluide (Office québécois de la langue française, 1994).
Porosité	Rapport, exprimé en pourcentage, du volume des vides d'un matériau à son volume total (Office québécois de la langue française, 1994).
Module de Young	Valeur de la constante correspondant à la relation linéaire entre la contrainte appliquée en traction et la déformation mesurée. Cette constante est représentée par la pente de la droite du domaine élastique dans le diagramme « contrainte-déformation ».
Résistance à la compression	Capacité d'un matériau à supporter une compression (écrasement) avant l'atteinte du point de rupture.
Résistance à la traction	Capacité d'un matériau à résister à son extension avant l'atteinte du point de rupture.
Roche ignée	Roche (magmatique) résultant de la solidification de magma (Foucault, 1995).

Roche métamorphique	Roche formée sans fusion à partir de roches préexistantes, et cela essentiellement par des recristallisations dues à des élévations de la température et de la pression (Foucault, 1995).
Roche plutonique	Roche formée par la cristallisation lente d'un magma à une certaine profondeur, généralement grenue et homogène dans de grands volumes (Foucault, 1995).
Roche sédimentaire	Roche formée à la surface de la Terre constituant le plus souvent des dépôts stratifiés en lits superposés (Foucault, 1995).
Roche volcanique	Roche formée par l'activité volcanique.
Schistosité	Feuilletage plus ou moins serré présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification et selon lequel les roches peuvent se débiter en lames plus ou moins épaisses et régulières (Foucault, 1995).
Stratification	Fait d'être composé de strates (Foucault, 1995).
Striction	Rapport de la diminution de section à la section initiale d'un barreau généralement cylindrique après rupture à l'essai de traction (Office québécois de la langue française, 1990). Aussi appelée « résistance au pic ».

1. INTRODUCTION

Pour l’approvisionnement en eau souterraine des résidences privées, l’aménagement de puits dans les dépôts meubles ou dans le socle rocheux demeure la principale méthode de prélèvement d’eau. Cependant, les conditions hydrogéologiques rencontrées sont souvent contraignantes et demandent des méthodes innovantes pour maximiser l’exploitation des volumes disponibles. Depuis plusieurs années, l’hydrofracturation du socle rocheux est proposée à plusieurs propriétaires de puits résidentiels afin d’en augmenter la capacité de production.

L’hydrofracturation du socle rocheux dans lequel sont aménagés les puits d’eau potable est une méthode relativement récente¹. Elle découle des activités de l’industrie pétrolière et gazière, qui l’emploie pour maximiser la récupération du pétrole et du gaz des réservoirs souterrains profonds. C’est donc dans l’objectif de circonscrire les pratiques liées aux activités d’hydrofracturation du roc dans lequel sont aménagés des puits résidentiels que le *Guide technique – Hydrofracturation de puits résidentiels* est proposé. Il permettra notamment de recommander des méthodes reconnues dans la littérature, et ce, afin de minimiser les impacts négatifs pouvant découler de ce type de pratique.

2. À QUI S’ADRESSE LE GUIDE?

Le *Guide technique – Hydrofracturation de puits résidentiels* s’adresse aux entrepreneurs puisatiers agissant dans le domaine de l’eau souterraine qui pourraient être appelés à réaliser des travaux d’hydrofracturation. Il s’adresse aussi à toute firme de consultants ou à tout professionnel du domaine de l’hydrogéologie qui aurait à assurer la supervision de travaux d’hydrofracturation de puits d’eau potable résidentiels.

3. POURQUOI DÉVELOPPER DES FRACTURES DANS LE ROC D’UN PUIT RÉSIDENTIEL?

En général, le socle rocheux sain constitue un médium de piètre qualité pour l’emménagement et le transport de l’eau. Cela est d’autant plus vrai pour les roches ignées (magmatiques) et métamorphiques, dont la porosité est moins importante que celle des roches sédimentaires. En raison de leur faible perméabilité, l’écoulement des eaux souterraines dans le socle rocheux se fera par le chemin de moindre résistance, soit le réseau de fractures. Si la fracturation du socle rocheux n’est pas bien développée, ou si l’interconnexion des fractures y est faible, la production d’eau par les puits qui y sont aménagés pourrait s’avérer insuffisante pour un usage résidentiel. Afin de pallier ce problème, le développement du réseau de fractures existant peut être envisagé. Cette approche permet de bonifier la quantité de chemins préférentiels, de favoriser les interconnexions entre les fractures et d’augmenter, ainsi, le volume d’eau pouvant circuler localement dans le socle rocheux.

¹ Selon Baski (2004), les premières interventions d’hydrofracturation sur des puits domestiques datent des années 1970.

4. MÉTHODES DE FRACTURATION NON RECOMMANDÉES

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour augmenter la capacité d'un puits, dont l'utilisation d'acide, d'explosifs ou de glace sèche (CO₂). Toutefois, celles-ci sont peu recommandées en raison des risques importants qui peuvent en découler. En effet :

- Le développement de puits à l'aide d'acide est généralement efficace pour un aquifère développé dans une formation calcaire, dolomitique ou dans une formation semi-consolidée cimentée par une matrice carbonatée. L'acide dissout les matériaux naturellement présents dans les vides et augmente ainsi la conductivité hydraulique générale de la formation. Selon la concentration de l'acide, cette approche peut s'avérer très dangereuse et ne devrait être considérée que dans des conditions spécifiques;
- Le développement de puits à l'aide de dynamite, une technique dont l'historique documenté remonte jusqu'en 1860, semble montrer des résultats encourageants dans certains contextes, mais désastreux en d'autres occasions. En plus de la dangerosité liée à la manutention des explosifs, il est difficile de prédire si l'amorce d'explosifs dans un puits permettra d'en améliorer la capacité, principalement dans une formation sédimentaire comme un grès (Driscoll, 1986). En effet, la détonation pourrait entraîner une dislocation partielle des parois internes du puits, créant ainsi des fragments qui, selon leur dimension, pourraient se coincer dans le forage et justifier l'abandon du puits. De plus, les risques de contamination des eaux souterraines par des produits issus d'explosifs, comme les composés organiques de la famille des nitroaromatiques, ne peuvent être écartés;
- Le développement d'un puits à l'aide de glace sèche (CO₂) consiste en la création d'une pression croissante dans la partie supérieure du puits. Or, cette pression, pratiquement incontrôlable, peut croître à point tel que le tubage pourrait se disloquer de son ancrage au socle rocheux, brisant le scellement au roc et rendant possible la percolation des eaux de surface à l'intérieur du puits. Un gouvernement provincial rapporte qu'à certaines occasions, la totalité du tubage initialement ancré au roc s'est vu propulsé hors du sol (Government of Newfoundland and Labrador, 2018).

5. QU'EST-CE QUE L'HYDROFRACTURATION?

5.1 Le concept

L'hydrofracturation consiste à injecter de l'eau sous pression dans une section isolée d'un forage dans le roc jusqu'à ce que la pression exercée permette d'ouvrir les fractures existantes ou d'accroître leur portée. Par ce processus, la quantité, la portée et l'interconnexion des fractures seront augmentées, ce qui favorisera la distribution spatiale du réseau de fractures et en améliorera la capacité. Considérant la vocation première d'un puits privé, l'eau utilisée dans le processus d'hydrofracturation doit répondre aux normes de qualité de l'eau potable.

L'hydrofracturation est habituellement recommandée dans un contexte où des puits nouvellement aménagés présentent une capacité insuffisante pour subvenir aux besoins domestiques, ou dans le cas d'anciens puits dont la capacité a diminué avec le temps en raison de problématiques liées au colmatage des fractures productrices (minéralisation, incrustations bactériennes, accumulation de résidus fins, etc.). Pour déterminer la capacité d'un puits résidentiel à satisfaire à la demande, des méthodes de calcul sont

proposées dans diverses publications gouvernementales, dont le volume 1 du *Guide de conception des installations de production d'eau potable*².

Deux approches sont envisageables pour la réalisation de travaux d'hydrofracturation de puits résidentiels : l'hydrofracturation à l'aide d'un obturateur unique (méthode standard), ou l'hydrofracturation à l'aide de deux obturateurs (méthode de la zone ciblée).

La méthode standard (obturateur unique) est largement utilisée pour développer des puits à faible rendement, dans l'optique de maximiser leur capacité. Le type d'installation requis pour les travaux d'hydrofracturation standards est illustré à la **figure 1a**. Cette approche permet de contrôler les pressions d'injection ainsi que la profondeur d'injection par rapport à la surface du sol. Cette technique sollicite les parois rocheuses et les fractures existantes présentes entre l'obturateur et le fond du forage. Mentionnons que la méthode standard d'hydrofracturation peut être réalisée à partir de deux types d'obturateurs, soit les obturateurs mécaniques et les obturateurs pneumatiques. Les particularités, avantages et inconvénients de ces deux types d'obturateurs sont abordés à la section 7.3.1.

La méthode de la zone ciblée (deux obturateurs) permet d'isoler des sections du puits afin d'y concentrer les pressions. Les obturateurs sont positionnés à la base et au sommet de la section visée par les travaux (**figure 1b**). En plus d'être plus coûteuse que la méthode standard, elle nécessite une bonne connaissance de la disposition des fractures existantes afin d'optimiser le positionnement des obturateurs. Pour ces raisons, elle est souvent utilisée en dernier recours. Toutefois, malgré ces contraintes, la méthode d'hydrofracturation à deux obturateurs permet habituellement d'atteindre de meilleurs résultats.

² www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/documents/volume1.pdf

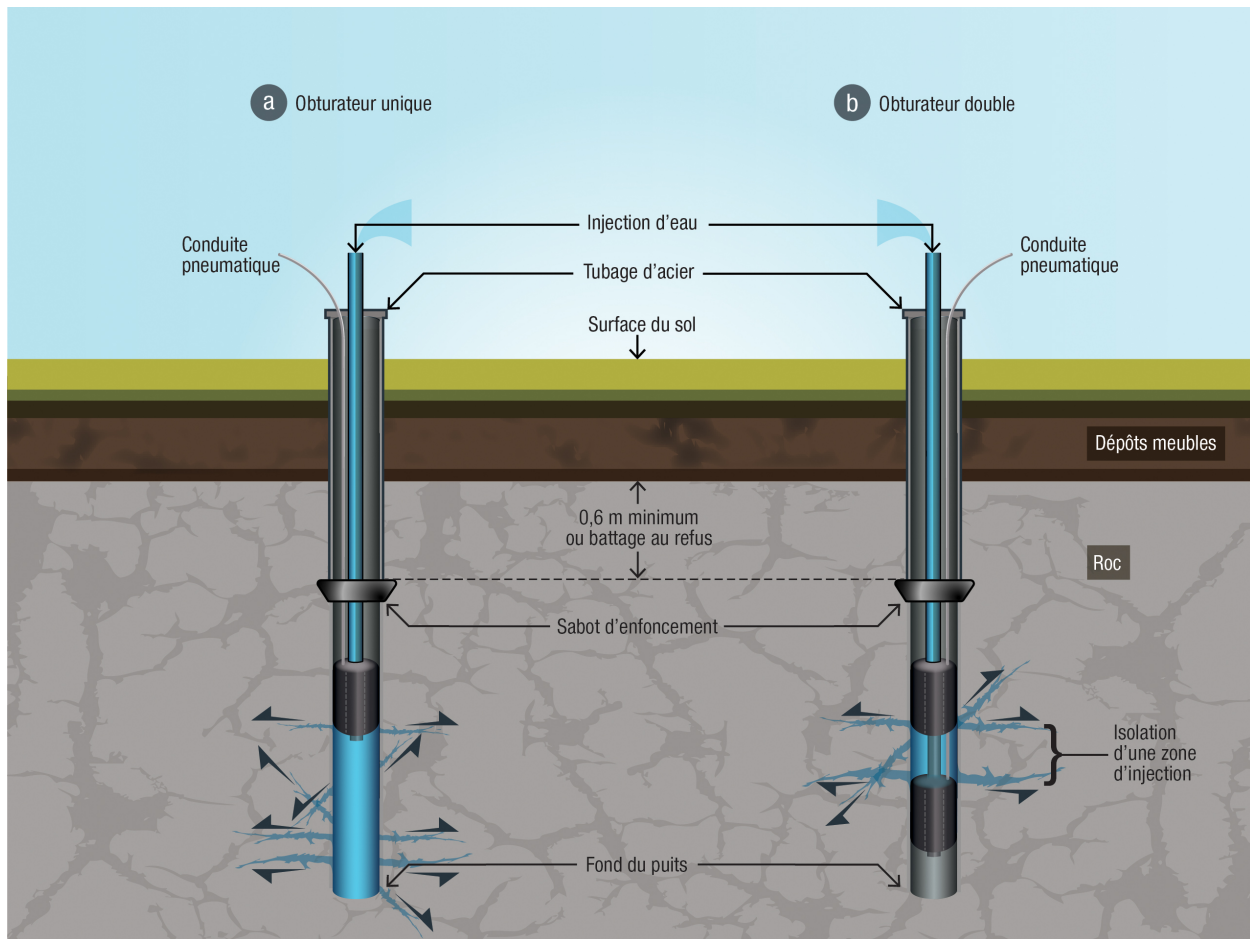


Figure 1 - Distinction entre l'hydrofracturation par a) la méthode standard à obturateur unique et b) la méthode de zone ciblée à deux obturateurs.

5.2 La science derrière le concept

Afin de bien saisir les enjeux liés à l'hydrofracturation, il convient d'étudier sommairement quelques notions portant sur les processus régissant la création de fractures dans le socle rocheux et l'ouverture de fractures existantes. Pour ce faire, les caractéristiques physiques et mécaniques du socle rocheux seront abordées, au même titre que de la distribution des principales contraintes trouvées dans le roc à de faibles profondeurs (< 1 000 m). En effet, ce sont les particularités mécaniques du socle rocheux et la répartition spatiale des contraintes qui dicteront la réponse du roc à l'hydrofracturation.

5.2.1 La distribution spatiale des contraintes dans le roc

Dans le socle rocheux, si l'on isole une surface donnée, cette surface peut subir une contrainte le long d'un axe perpendiculaire à la face. Cette contrainte est appelée « contrainte normale » (**figure 2a**). Une autre contrainte peut être développée parallèlement à la face. Cette dernière est appelée « contrainte de cisaillement » (**figure 2a**). Lorsque la contrainte de cisaillement est égale à zéro, le plan est reconnu comme plan principal et la contrainte normale devient une contrainte principale (Jager et Cook, 1979).

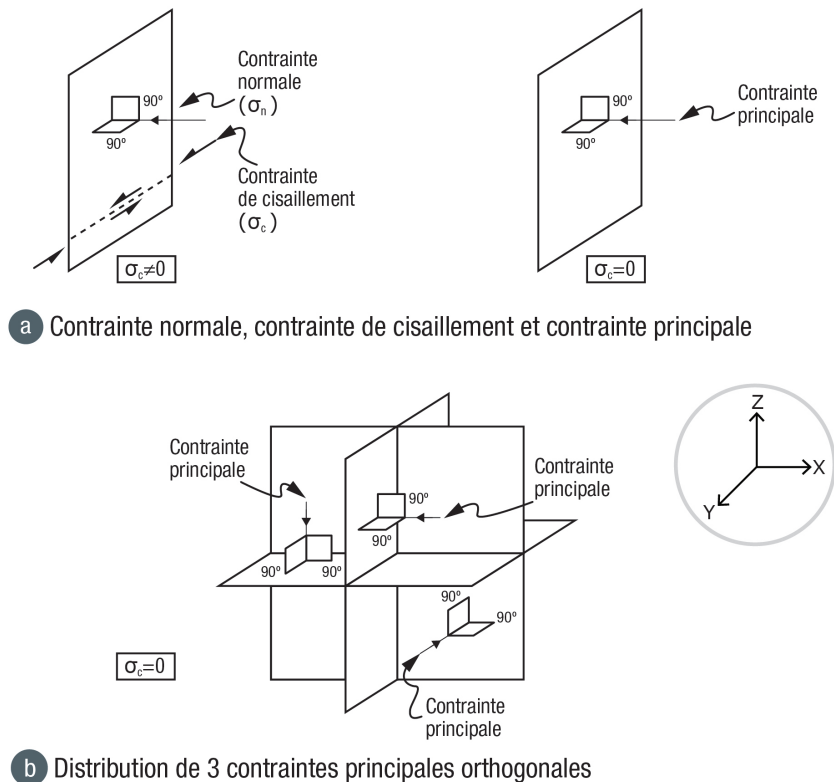


Figure 2 - Distinction entre les contraintes normales, les contraintes de cisaillement et les contraintes principales.

En un point donné, on peut toujours trouver trois plans perpendiculaires les uns aux autres sur lesquels les contraintes de cisaillement sont nulles et où les contraintes normales deviennent trois contraintes principales (**figure 2b**). Les contraintes principales sont donc orientées selon trois axes orthogonaux, à la manière des arêtes d'un cube. Ces contraintes sont de trois ordres de grandeur : une contrainte principale maximale ou majeure (σ_1), une contrainte principale intermédiaire (σ_2) et une contrainte principale minimale ou mineure (σ_3). À faible profondeur, c'est-à-dire à des profondeurs habituellement atteintes pour le forage de puits privés, une fracture (un plan en 2D) se développera perpendiculairement à la contrainte principale la plus faible (σ_3), comme l'illustre la **figure 3**.

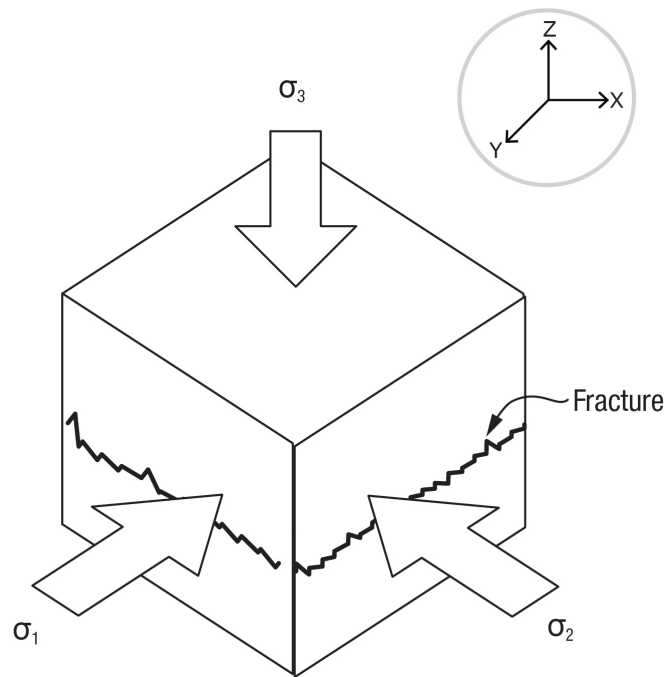


Figure 3 - Distribution des contraintes dans le socle rocheux à faible profondeur (<math>< 1000\text{ m}</math>) (modifié de Comeskey et Smith, 2015).

En général, la contrainte principale minimale (σ_3) s'oriente verticalement et représente la pression exercée par la couverture rocheuse. Cette pression est relativement faible comparativement aux pressions tectoniques horizontales qui dominent le champ de forces. Pour des puits forés, la couverture rocheuse est faible et l'orientation préférentielle pour le développement de fractures sera perpendiculaire à σ_3 , c'est-à-dire dans le plan horizontal (le plan des contraintes σ_1 et σ_2). On note d'ailleurs cette distribution préférentielle des fractures en subsurface par la présence naturelle de grands joints subhorizontaux liés à la décompression du socle rocheux, développés à la suite du retrait des glaciers (phénomène d'isostasie). Mentionnons toutefois que plusieurs paramètres géologiques pourront influencer la propagation du plan de fracturation, comme la stratification, la schistosité, le clivage, la gneissosité et l'altération.

5.2.2 Les caractéristiques du socle rocheux

L'environnement géologique du Québec est constitué d'une grande diversité de type de roches. Que ce soit des roches ignées, plutoniques ou volcaniques, des roches métamorphiques ou sédimentaires, chacune aura ses propriétés physiques et mécaniques. Les propriétés physiques décrivent essentiellement la constitution naturelle de la roche et les particularités qui en découlent (porosité, masse volumique, teneur en eau, etc.), alors que les caractéristiques mécaniques décrivent plutôt la réponse d'un échantillon de roc à des forces qui lui sont appliquées. On parle ici de résistance à la compression, de résistance à la traction, de résistance au cisaillement, du coefficient de Poisson, du module de Young, etc.

La résistance à la traction est considérée comme déterminante dans le processus de création d'une fracture par hydrofracturation. De manière générale, la résistance à la traction représente la capacité d'un matériau à résister à son extension. Pour mesurer cette résistance, on réalise en laboratoire un essai de traction sur un échantillon cylindrique de roc sain. La procédure consiste à exercer un taux de déformation constant de l'échantillon en extension. Ce taux de déformation est appliqué jusqu'à ce que

l'échantillon se brise, c'est-à-dire jusqu'à sa rupture. En cours d'essai, l'allongement de l'échantillon est mesuré, ainsi que la force de traction appliquée (contrainte). Sauf indications contraires, l'essai est réalisé à température ambiante (20 °C). La **figure 4** schématise le type d'installation permettant de réaliser un essai de traction sur un cylindre de roc.

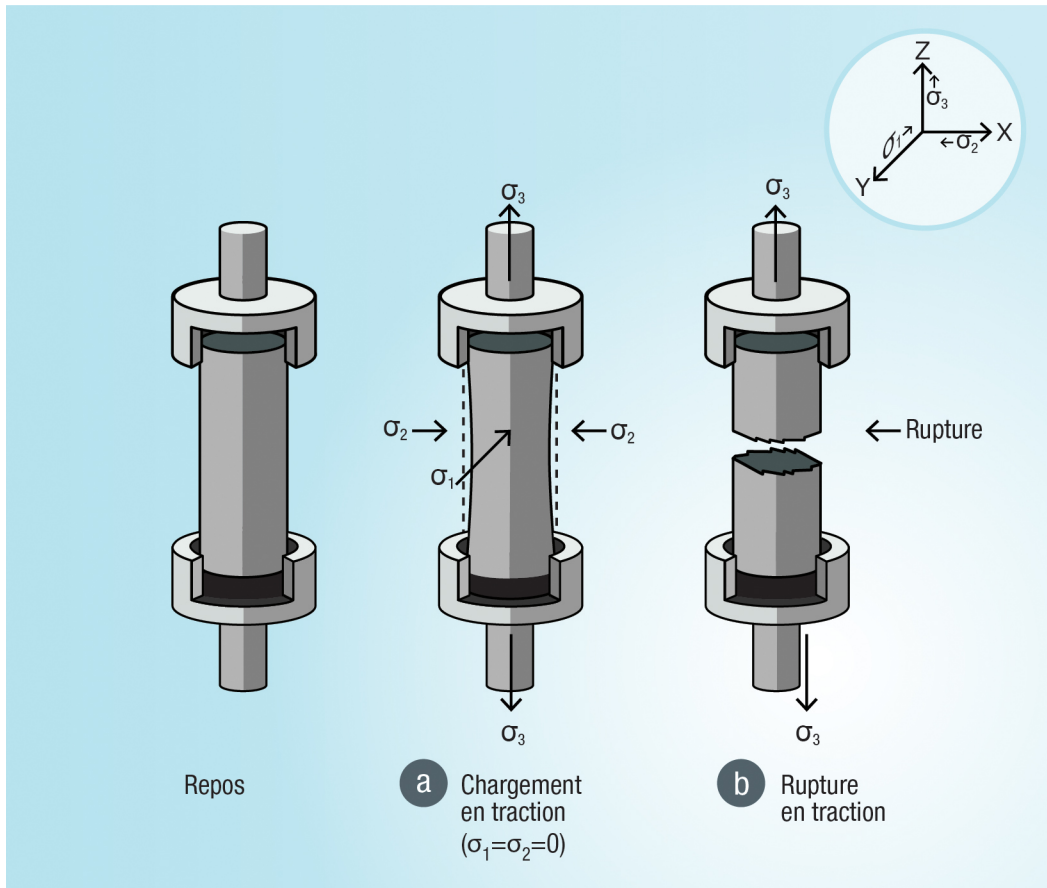


Figure 4 - Création d'une fracture sur un cylindre de roc dans le cadre d'un essai de traction.

Mentionnons que le principe de cet essai est simple et n'est présenté ici qu'à titre indicatif. En effet, ce type d'essai est peu courant en mécanique des roches pour des raisons pratiques. Toutefois, d'autres méthodes, comme l'essai brésilien (aussi connu sous le nom d' « essai de traction indirect »), sont plus fréquemment utilisées pour obtenir une valeur de résistance à la traction.

Comme le roc n'est pas reconnu pour ses capacités élastiques à des températures et à des pressions faibles, la déformation dans le domaine élastique (**figure 4a**) sera négligeable et l'échantillon aura plutôt tendance à se fracturer. En général, si l'on transpose les mesures de pression et de déformation recueillies dans le cadre d'un essai en traction typique, on obtiendra un graphique qui s'apparente à celui de la **figure 5**. L'axe horizontal représente la déformation de l'échantillon (étirement), alors que l'axe vertical représente la contrainte appliquée en mégapascals (MPa).

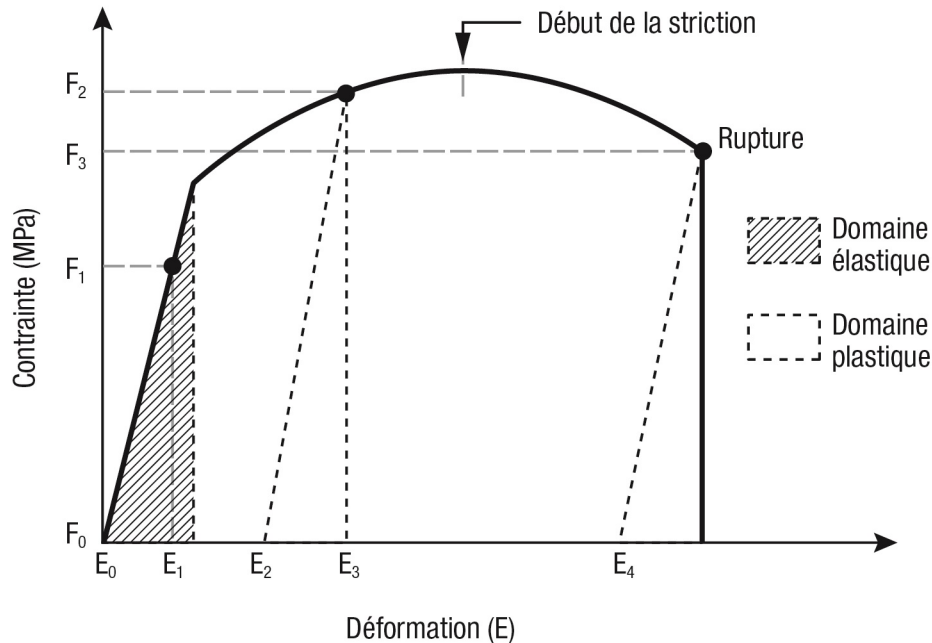


Figure 5 - Réponse typique d'un échantillon de roc lors d'un essai de traction.

Le diagramme de la figure 5 permet d'apprécier le comportement d'un matériau soumis à une contrainte en traction jusqu'à la rupture. Les étapes suivantes peuvent être observées :

1. Au repos, la contrainte en traction appliquée est nulle ($F_0 = 0$) tout comme la déformation ($E_0 = 0$);
2. Une contrainte F_1 appliquée à l'échantillon impose un étirement équivalent à E_1 . Cette déformation se fait dans le domaine élastique du matériau, ce qui implique qu'une fois la contrainte F_1 relâchée ($F_1 \rightarrow F_0$), l'étirement E_1 diminue jusqu'à sa valeur initiale (E_0) et l'échantillon n'indique aucune déformation résiduelle;
3. Une contrainte est appliquée à l'échantillon jusqu'à une valeur F_2 , ce qui entraîne une déformation d'allongement E_3 . Cette déformation du domaine plastique implique qu'une fois la contrainte F_2 relâchée ($F_2 \rightarrow F_0$), une déformation résiduelle E_2 demeure ($E_3 \rightarrow E_2$);
4. En poursuivant l'étirement de l'échantillon à une vitesse constante, on atteint le point de striction (résistance au pic). Ce point est marqué par une diminution de la force appliquée à l'échantillon malgré une vitesse d'allongement constante. À partir de ce moment, on note une réduction de la circonférence de l'échantillon (diminution de l'aire de la section transversale);
5. En poursuivant l'application d'une force en traction pour maintenir la vitesse d'étirement constante, le point de rupture est ultimement atteint alors que la contrainte nécessaire à l'étirement tombe instantanément à zéro ($F_3 \rightarrow F_0$); l'échantillon est scindé (fracturé). Il est possible de calculer la déformation à l'étirement ultime (E_4) avant la rupture de l'échantillon.

En résumé, la création d'une nouvelle fracture aura lieu lorsque la tension appliquée au massif rocheux excédera le domaine élastique et le domaine plastique (figure 5). Dans ce processus, l'opérateur devrait noter une hausse constante de la pression suivie d'une diminution instantanée sur les manomètres. Pour des fractures existantes, une perte de pression instantanée devrait aussi être observée, mais à des pressions inférieures. C'est dans ce contexte d'hydrofracturation que la plupart des travaux sont réalisés, et c'est ce dernier (fracture existante) qui sera abordé plus loin.

La résistance en traction, habituellement mesurée en mégapascals (MPa), variera selon la nature du roc. Cette variation sera fonction, notamment, de la composition cristalline du roc, de sa granulométrie ainsi que de son mode de formation (sédimentaire, ignée, métamorphique, etc.). Le tableau 1 présente des valeurs typiques de résistance en traction en fonction de la nature du socle rocheux.

Tableau 1 - Valeurs typiques de résistance en traction selon la nature du roc.

TYPE DE ROC	RÉSISTANCE EN TRACTION	
	(MPa)	(psi ³)
Sédimentaire		
Calcarénite	0,7	102
Dolomie	3,0 - 5,7	435 - 827
Gypse	1,6	232
Calcaire	1,6 - 7,1	232 - 247
Grès	1,2 – 8,1	174 - 1175
Shale	0,2 - 5,6	29 - 812
Ignée		
Granite	6,3 – 11,9	914 - 1726
Syénite	20,5	2973
Volcanique		
Trachyte	13,7	1987
Basalte	13,1 – 14,5	1900 - 2103
Métamorphique		
Gneiss	6,9 - 8,2	1001 - 1189
Marbre	7,5	1088
Quartzite	16,3	2364
Schiste	13,3	1929

³ Livre-force par pouce carré (pound-force per square inch).

5.2.3 À quel moment une fracture se forme-t-elle dans le roc?

Selon Elsworth (2013), la rupture du roc autour d'un trou de forage a lieu au moment où la pression accumulée dans le trou de forage (P) excède la somme de la contrainte principale minimale (σ_3) et de la résistance en traction du roc (T_0). Cette relation peut s'exprimer de la façon suivante :

$$P > (T_0 + \sigma_3)$$

En conséquence, la création d'une nouvelle fracture par l'hydrofracturation se fera alors que la pression (P) de l'eau injectée dans la section du forage isolée par l'obturateur augmentera jusqu'à excéder la somme des pressions associées à la couverture rocheuse (σ_3) et à la résistance en traction du roc (point du début de la striction de la **figure 3** et du **tableau 1**).

Ainsi, la pression requise pour créer une nouvelle fracture sous une couverture de roc de quelques dizaines de mètres devrait se trouver dans une fourchette de valeurs plus importante que la seule valeur de la résistance en traction du roc (T_0). En effet, il faut aussi pallier la pression verticale exercée par la couverture de roc (σ_3). En conséquence, pour une même profondeur (< 1 000 m), l'agrandissement des fractures existantes sera favorisé au détriment de la création de nouvelles fractures :

$$\text{Si } T_0 = 0 \text{ (fracture existante) } \quad \text{alors } P_1 > \sigma_3$$

$$\text{Si } T_0 > 0 \text{ (aucune fracture existante) } \quad \text{alors } P_2 > T_0 + \sigma_3$$

$$\text{Ainsi } P_1 < P_2$$

5.2.4 Comment se comporte le roc en cours de travaux d'hydrofracturation?

Baski (2004) décrit le processus de fracturation hydraulique en trois étapes simples, habituellement applicables à une formation rocheuse ignée ou métamorphique (plutôt qu'à une formation rocheuse sédimentaire) :

1. La première étape consiste en l'ouverture des fractures existantes. Cette étape implique l'infiltration d'eau dans une fracture remplie de sédiments ou d'argile jusqu'à ce que le volume injecté exerce une pression de levage (*jacking pressure*) sur le roc sus-jacent de manière à permettre l'ouverture de la fracture;
2. La deuxième étape implique l'injection d'importants volumes d'eau dans la fracture agrandie, la libérant des particules argileuses ou d'autres types de sédiments. La pression d'injection serait alors de l'ordre de 30 à 50 % de la pression de levage (*jacking pressure*);
3. La troisième et dernière étape consiste en la fermeture de la pompe d'injection et en l'ouverture d'une valve à la tête du puits de manière à permettre un retour d'eau vers la surface par dépressurisation. À ce moment, le puits se comporte comme un puits jaillissant avec une forte pression artésienne. C'est au cours de cette manœuvre que les sédiments et particules d'argile sont retournés vers la surface.

La **figure 6** présente deux réponses typiques du suivi des pressions d'injection dans le puits. Le tracé obtenu permet d'interpréter le comportement du roc en cours de travaux.

La **figure 6a** montre une première pointe de pression de courte durée, indiquant que la pression de levage (*jacking pressure*) est supérieure à la pression requise pour maintenir la fracture ouverte. Suivant l'ouverture de la fracture, la pression se stabilise dans le temps (plateau de pression), alors que d'importants volumes d'eau sont injectés pour déloger les incrustations et remplir les vides. La pression revient à la pression de la formation aquifère lorsque la pompe est arrêtée et que la valve à la tête du puits est ouverte, permettant la décompression du système et la vidange des sédiments et particules d'argile vers la surface.

La **figure 6b** présente un phénomène similaire. Toutefois, la pression de levage (*jacking pressure*) y est inférieure ou égale à la pression requise pour maintenir la fracture ouverte.

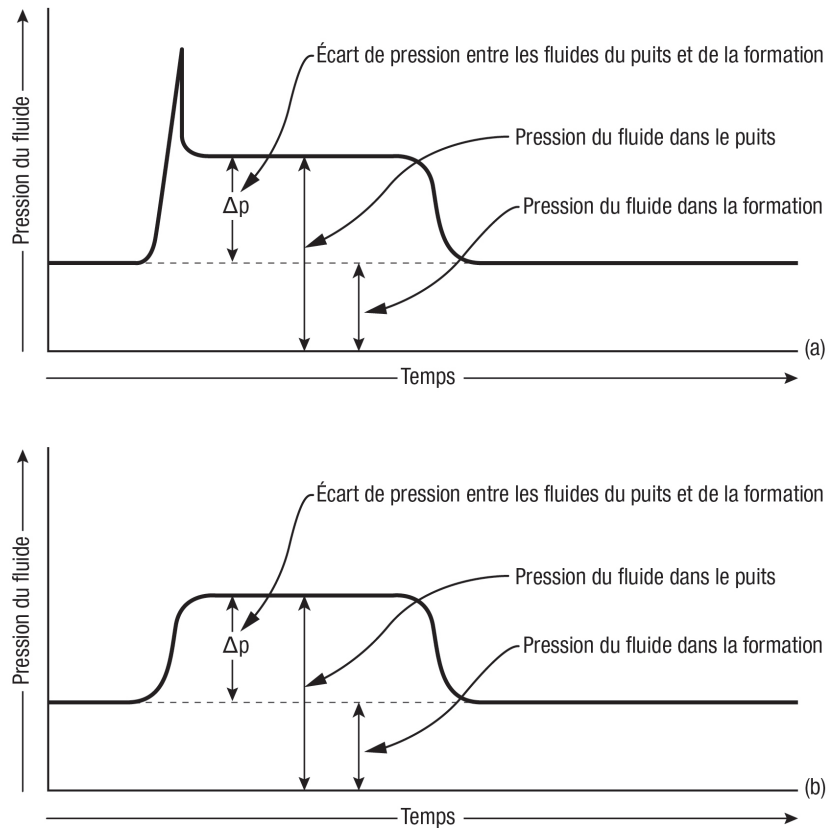


Figure 6 - Deux types de comportements associés à la pression d'injection (modifiée de Williamson et Woolley, 1980).

6. EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES

Dans le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP), la pratique de l'hydrofracturation dans les puits résidentiels est encadrée par les articles suivants :

Article 12

Pour l'application du présent chapitre [chapitre III], l'aménagement d'une installation de prélèvement d'eau comprend son implantation, sa modification substantielle ou son remplacement.

Une modification substantielle vise notamment l'approfondissement d'un puits, sa **fracturation** ou son scellement.

Article 18

À moins qu'une installation de prélèvement d'eau souterraine soit obturée conformément à l'article 20, celle-ci doit, en tout temps, être exploitée dans les conditions suivantes :

1. 1° l'installation doit être munie d'un couvercle sécuritaire, résistant aux intempéries, aux contaminants, à la vermine et, si l'installation est exposée à des risques d'immersion, aux infiltrations d'eau;
2. 2° la finition du sol autour de l'installation doit empêcher la présence d'eau stagnante et prévenir le ruissellement d'eau en direction de l'installation sur une distance de 1 m autour de l'installation;
3. 3° l'installation doit être repérable visuellement;
4. 4° si une activité de **fracturation hydraulique** est effectuée à partir de l'installation, de l'eau répondant aux normes de qualité d'eau potable prévues au Règlement sur la qualité de l'eau potable (chapitre Q-2, r. 40) doit être utilisée.

Le présent article s'applique également à un puits d'observation.

7. PROCÉDURE D'HYDROFRACTURATION

Lorsque l'hydrofracturation est considérée comme technique de développement d'un puits résidentiel, l'entrepreneur doit évaluer plusieurs éléments afin d'adapter les travaux aux conditions hydrogéologiques inhérentes au puits. Un organigramme décisionnel intégrant les divers points traités plus bas est présenté en annexe. Cet organigramme permettra d'éclairer l'entrepreneur ou le professionnel dans les décisions à prendre en cours de processus.

7.1 Évaluer le potentiel d'un puits à y pratiquer l'hydrofracturation

Le contexte géologique jouera un rôle prédominant dans le potentiel d'augmenter la capacité d'un ouvrage par la méthode d'hydrofracturation. Plusieurs documents font état de travaux d'hydrofracturation réalisés avec succès au sein d'aquifères développés dans des formations rocheuses cristallines (roches ignées ou métamorphiques). Toutefois, les documents portant sur des travaux d'hydrofracturation menés dans des aquifères rocheux développés dans des formations sédimentaires ou schisteuses se font plus rares.

L'entrepreneur devrait se questionner sur la possibilité que la conception même du puits devienne une source de problèmes pour l'une ou l'autre des raisons suivantes (Comeskey et Smith, 2016) :

- a) La paroi interne du forage permettra-t-elle un scellement étanche de l'obturateur?
- b) La profondeur du puits permet-elle l'installation de l'obturateur à une profondeur sécuritaire pour éviter la création de liens hydrauliques avec la surface?
- c) Y a-t-il des risques importants qu'on intercepte une source d'eau de piètre qualité comme le lixiviat d'une installation septique?
- d) La faible capacité du puits découle-t-elle réellement d'une problématique liée à la fracturation du socle rocheux ou serait-elle plutôt liée au colmatage des fractures par l'accumulation de concrétions minérales ou organiques (*biofouling*)?

Le choix de l'hydrofracturation comme méthode de développement d'un puits devrait tenir compte du risque, c'est-à-dire de la possibilité d'endommager l'ouvrage ou d'avoir à le condamner à la suite des travaux. Dans ce contexte, il sera prudent de réaliser, en amont, une comparaison des coûts entre l'hydrofracturation et d'autres approches comme l'aménagement d'un nouveau puits, l'approfondissement du puits existant ou l'emménagement d'eau dans un réservoir de surface (Comeskey et Smith, 2016).

7.2 Distances sécuritaires par rapport aux infrastructures

La portée du développement de fractures existantes lors de travaux d'hydrofracturation représente toujours un paramètre difficile à évaluer. En effet, l'hétérogénéité du socle rocheux complexifie considérablement l'estimation de la portée spatiale du mécanisme d'ouverture des fractures existantes. Ainsi, il est possible que des travaux d'hydrofracturation réalisés sur un puits résidentiel aient un impact sur des infrastructures avoisinantes comme des puits voisins ou des conduites souterraines. Par mesure de sécurité et préalablement aux travaux, il est recommandé de dresser un inventaire des sources de contamination potentielles des eaux souterraines, des puits avoisinants, des conduites souterraines et de toute autre composante pouvant affecter ou être affectée par les travaux. Cet inventaire devrait être réalisé dans le voisinage immédiat du puits visé par les travaux. Selon le résultat de cet inventaire, et en cas de risque présumé, l'entrepreneur ou le professionnel supervisant les travaux pourraient proposer des mesures palliatives telles que l'ajustement de la profondeur de l'obturateur par rapport à la surface.

La performance de l'hydrofracturation sera influencée par la nature du socle rocheux, la disposition spatiale des fractures, les pressions d'injection et la performance des équipements. Tous ces facteurs affecteront aussi le rayon d'action de l'hydrofracturation, c'est-à-dire la portée à laquelle les fractures existantes pourront être prolongées. Dans ce contexte, la distance entre le site d'hydrofracturation et les infrastructures avoisinantes ou toute source potentielle de contamination des eaux souterraines devrait être évaluée sur le site par l'entrepreneur puisatier ou le professionnel supervisant les travaux.

7.3 Préparation de l'ouvrage et des équipements requis

En prévision des travaux d'hydrofracturation, le puits doit être dégagé de tout équipement ou rebus qui pourrait nuire à leur réalisation. Ainsi, la pompe, les conduites et les fils d'alimentation électrique doivent être retirés. Par la suite, les équipements voués aux travaux de fracturation hydraulique pourront être positionnés dans le puits, selon la méthode d'hydrofracturation retenue (simple ou double obturateur).

Les équipements utilisés doivent demeurer sécuritaires par rapport aux pressions d'injection retenues dans le cadre des travaux, c'est-à-dire des pressions se situant entre 5 et 21 MPa (entre 800 et 3 000 psi). De plus, l'entrepreneur devrait se munir, selon la méthode utilisée, de diverses pièces d'équipement (Comeskey et Smith, 2016) :

- Une foreuse, une grue ou tout appareil de levage permettant de manipuler les outils et matériaux requis pour la réalisation des travaux;
- Une source suffisante d'eau répondant aux normes de qualité d'eau potable (réservoir ou citerne mobile) avec possibilité de réapprovisionnement;
- Des pompes ou un système de pompes avec débits, pressions et volumes appropriés;
- Un ensemble de vannes, de manomètres, de capteurs, de commandes, de valves et de raccords ou tout autre matériel requis pour surveiller et contrôler l'injection de fluides;
- Au besoin, un agent de soutènement (voir la section 5.6);
- Un ou deux obturateurs selon la méthode d'hydrofracturation retenue.

7.4 Sélection du type d'obturateur

Les obturateurs les plus utilisés sont les obturateurs mécaniques et les obturateurs pneumatiques (gonflables). De façon générale, les obturateurs mécaniques consistent en un anneau de caoutchouc positionné entre deux supports d'acier qui, en se rapprochant mécaniquement, compressent l'anneau de caoutchouc. Cette compression réduit l'épaisseur de l'anneau au profit de son rayon jusqu'à ce qu'il s'appuie fermement sur la paroi rocheuse, créant ainsi un joint étanche avec la paroi interne du puits (**figure 7a**).

L'obturateur pneumatique (**figure 7b**) permet de créer un joint étanche avec la paroi interne du puits en le gonflant à la manière d'un ballon à centre creux (beigne). Une fois gonflé, l'obturateur pneumatique montre une grande surface de contact avec la paroi interne du puits, ce qui maximise la surface de friction et en augmente l'adhérence. La pression induite dans l'obturateur est habituellement d'une fois et demie à deux fois la pression d'injection du fluide, pour éviter que l'obturateur se disloque en raison de l'écart de pression créé entre la section pressurisée du puits et la pression atmosphérique environnante (Comeskey et Smith, 2016).

7.5 Positionnement des obturateurs

Afin d'éviter la contamination de l'aquifère par un apport de polluant provenant de la surface, une attention particulière doit être portée au positionnement de l'obturateur. Certains États américains, provinces canadiennes et associations⁴ recommandent de positionner l'obturateur à une profondeur de 15 à 20 mètres par rapport à la surface du sol. Cette précaution vise à limiter la création de chemins d'écoulement préférentiels entre les fractures productrices de l'aquifère et les eaux de surface (source de contamination)⁵. De plus, l'obturateur devrait se trouver à au moins 6 mètres sous la base du tubage d'acier (sabot d'enfoncement). Cette configuration vise à conserver l'intégrité du scellement créé par l'ancrage du tubage dans le socle rocheux. Les **figures 7a et 7b** illustrent ces recommandations.

Peu importe si l'entrepreneur opte pour des travaux d'hydrofracturation à obturateur unique ou à deux obturateurs, les profondeurs sécuritaires recommandées demeurent applicables.

Pour des travaux d'hydrofracturation à obturateur unique, l'obturateur devrait être positionné le plus près possible de la surface en respectant les profondeurs sécuritaires décrites plus haut.

HYDROFRACTURATION PAR LA MÉTHODE DE L'OBTURATEUR UNIQUE

Lors du premier essai d'injection, la fracture montrant la plus faible résistance en traction sera sollicitée en priorité. Dès son ouverture, le manomètre indiquera une chute soudaine de la pression d'injection (**figure 6**) et le système devra être dépressurisé. À ce moment, il est recommandé d'évaluer si le premier essai d'hydrofracturation a permis d'atteindre la capacité (débit) nécessaire pour répondre au besoin résidentiel évalué d'après la méthode décrite à la section 5.1. Si cet objectif n'est toujours pas atteint, il est recommandé d'approfondir l'obturateur et de procéder à un deuxième essai.

Si la fracture affectée par le premier essai se trouve toujours sous l'obturateur, le manomètre n'indiquera aucune accumulation de pression significative et aucune fracture ne sera sollicitée. À l'inverse, si la fracture affectée par le premier essai se trouve au-dessus de l'obturateur, le manomètre

⁴ New Hampshire Department of Environmental Services (2010), National Driller (2007), The American Well Owner (2003), Comeskey et Smith (2016), Government of Newfoundland and Labrador (2018).

⁵ Selon le contexte, cette profondeur pourrait varier de 6 à 12 mètres. L'entrepreneur doit tenir compte de la fréquence des fractures sous la base du tubage. En l'absence de cette information, il est recommandé de favoriser une approche « conservatrice », c'est-à-dire de favoriser un obturateur profond.

Pour des travaux d'hydrofracturation à obturateurs doubles, les obturateurs devraient généralement être espacés de 15 à 20 mètres et positionnés de manière à cibler certaines familles de fractures recoupant les puits. L'obturateur le plus près de la surface doit respecter les profondeurs sécuritaires décrites à la figure 7b.

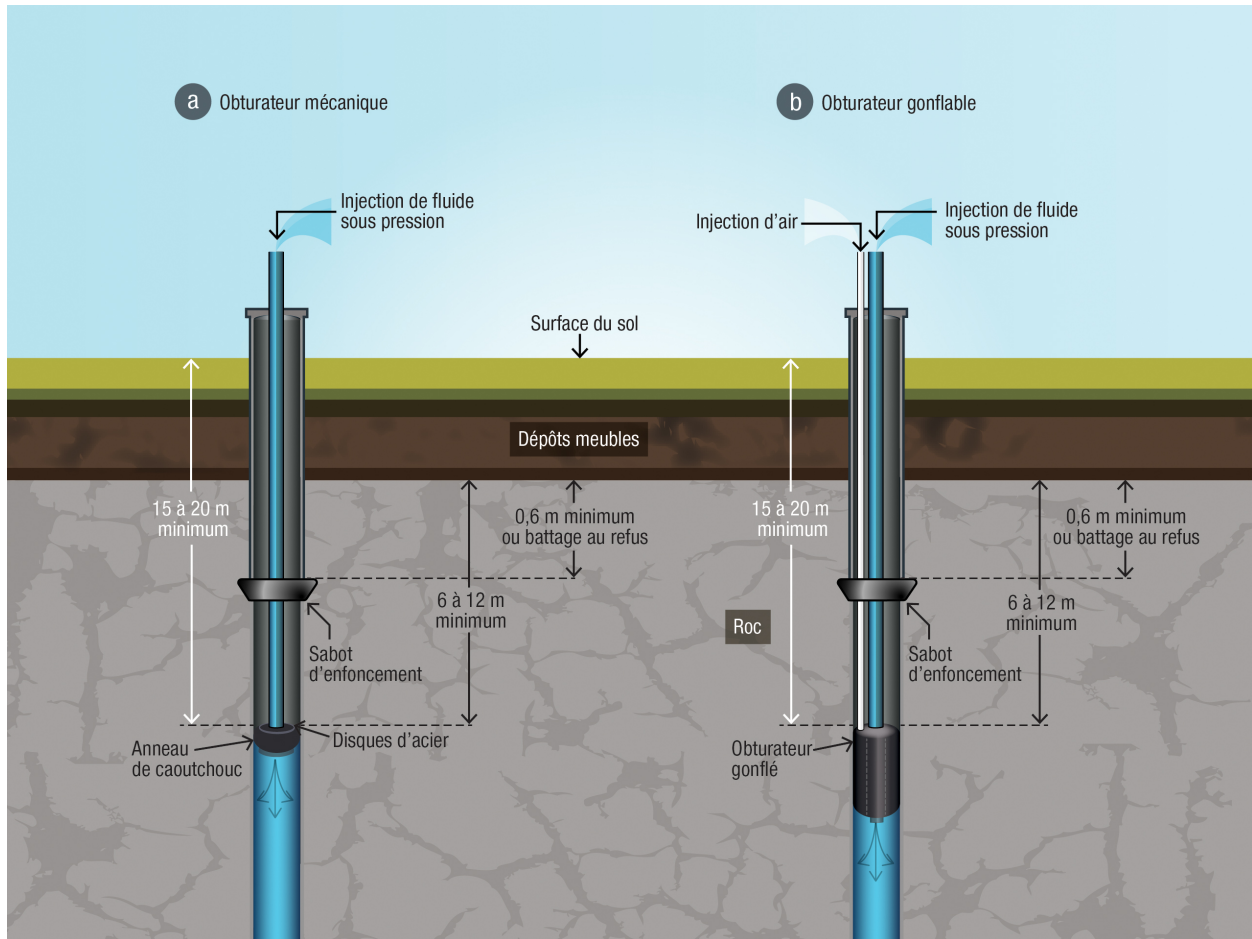


Figure 7 - Types d'obturateurs et profondeurs d'installation recommandées.

7.6 Agents de soutènement

L'utilisation d'agents de soutènement permet d'insérer de fines particules à l'intérieur des fractures de manière à ce qu'elles s'y coincent et empêchent la fermeture des fractures une fois le système dépressurisé. Du même coup, cette couche favorise la formation d'un chemin d'écoulement préférentiel tout en agissant comme support structural, maximisant ainsi le déploiement du réseau de fracturation et son exploitation subséquente. L'utilisation d'agents de soutènement n'est recommandée que dans des contextes géologiques où les fractures ont tendance à se refermer en raison des importantes pressions lithostatiques (grandes profondeurs), ou dans un réseau de fractures développé au sein de roches « molles/ductiles » ou fortement altérées.

Dans l'industrie du gaz et du pétrole, il est assez fréquent qu'on utilise des agents de soutènement synthétiques (billes de verre, particules de sable recouvertes de résine ou billes de céramique) dans un fluide d'injection autre que l'eau. Considérant les faibles pressions isostatiques exercées sur le socle rocheux aux profondeurs sondées pour l'aménagement de puits résidentiels, l'utilisation d'agents de soutènement dans le développement de puits résidentiels n'est pas pratique courante. Toutefois, lorsque cela est requis, l'utilisation d'agents de soutènement devrait se limiter à des particules de sable.

7.7 Évaluation de la performance des travaux d'hydrofracturation

L'évaluation de la performance des travaux d'hydrofracturation à l'aide d'essais de capacité est répandue dans le secteur municipal, commercial et industriel. Bien qu'inhabituelle dans le secteur résidentiel, l'estimation de la capacité d'un puits pourrait être justifiée dans certains cas d'exception où, par exemple, des travaux d'hydrofracturation pourraient affecter l'intégrité d'un puits avoisinant.

Les essais de capacité permettent d'obtenir un portrait général de la performance de l'ouvrage en créant une demande dans le puits. Cette demande à débit constant est maintenue durant une période de temps suffisante pour entraîner un rabattement significatif. La capacité de l'ouvrage C représente le rapport entre le débit pompé Q (L/min) et le rabattement s (m) mesuré au terme de l'essai et suit l'équation suivante :

$$C = Q/s$$

Réaliser un essai de capacité avant et après les travaux d'hydrofracturation permet de quantifier le gain de performance. Les essais de capacité réalisés sur un même puits avant et après les travaux d'hydrofracturation devraient l'être dans les mêmes conditions, c'est-à-dire en créant une demande à un débit identique pour une période de temps équivalente.

Rappelons qu'en cours d'hydrofracturation, d'importants volumes d'eau sont injectés dans le massif rocheux. Suivant la dépressurisation du puits, un certain temps devra s'écouler avant que la nappe phréatique ne retrouve son état d'équilibre. Il est recommandé de suivre les fluctuations piézométriques du puits jusqu'à ce que ces dernières se stabilisent avant de procéder à un essai de capacité post-travaux.

8. RAPPORT DE TRAVAUX D'HYDROFRACTURATION

Afin de permettre au propriétaire de conserver un historique des travaux réalisés sur son puits et des mesures de capacité obtenues lors des essais hydrauliques, il est recommandé que l'entrepreneur transmette les informations et documents suivants au propriétaire :

- une copie du rapport de forage exigé à l'article 21 du RPEP;
- la justification ayant mené aux travaux d'hydrofracturation;
- le volume d'eau injecté et la pression d'injection;
- les dates des travaux et leur durée respective;
- le niveau piézométrique statique mesuré avant les travaux pour un puits existant et la date de la mesure;
- Si un essai de capacité a été réalisé dans le puits visé par les travaux ou dans un puits avoisinant, la capacité du ou des ouvrages mesurés avant et après les travaux, y compris les données recueillies en cours d'essai.

Dans le but d'uniformiser la pratique et de simplifier la consultation ultérieure en fonction d'un référentiel spatial, toute référence de profondeur dans le rapport de travaux d'hydrofracturation devrait être calculée en fonction du niveau du sol.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BASKI, H. *The art of Hydrofracturing*, Journal of Well development, 2006.
- BASKI, H. *Ask Hank! Hydrofracturing* – Parts 1-17, World Wide Drilling Resource, 2004-2006 (www.baski.com).
- CHAPUIS, R. *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*, Publications du Québec, 2007, 156 p.
- COMESKY, A., SMITH, S. *Hydrofracturing as a tool for increasing water well capacity*, Ground water science, LLC, 2015, 31 p.
- COMESKY, A., SMITH, S. *An Introduction to Water Well Hydrofracturing: A Form of Well Development and Cleaning*, 2nd edition, National Ground Water Association, 2016, 71 p.
- DRISCOLL, F. *Groundwater and Wells*, 2nd edition, Saint-Paul, MN, Johnson Filtration Systems Inc., 1986, 1089 p.
- ELLSWORTH, W.L. *Injection-induced earthquakes*, Science, 341, 2013.
- FOUCAULT, A., RAOULT, J.-F. *Dictionnaire de géologie*, 4^e édition, Paris Milan Barcelone, Masson, 1995, 324 p.
- GOODMAN, R.E. *Introduction to rock mechanics*, 2nd edition, New York, John Wiley and sons, 1989, 562 p.
- GOVERNMENT OF NEWFOUNDLAND AND LABRADOR. *Fact Sheet for Water Well Development by Hydrofracturing*, Municipal affairs and environment, Newfoundland - Labrador, 2018, 3 p.
- HAINS, Sylvain. *Détermination des propriétés de transport du TNT dans les sols et les eaux souterraines en relation avec la démonstration de l'atténuation naturelle, à un site de production d'explosifs*, mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoresources, 2002, 423 p.
- JAEGER, J.C., COOK, N.G.W. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd edition, Chapman and Hall, London, volume 117, number 4 - N. H. W, 1979, 593 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. *Guide de conception des installations de production d'eau potable*, Québec, 2017, volume 1, 295 p.
- NATIONAL DRILLER. *Water Well Hydrofracturing Basics*, 2007, site Web [<https://www.nationaldriller.com/articles/86936-water-well-hydrofracturing-basics>].
- NEW HAMPSHIRE DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SERVICES. *Environmental Fact Sheet / Well development by hydro-fracturing*, New Hampshire, 2019, WD-DWGB-1-3, 2 p.
- PERRAS, M., DIEDERICHS, M. *A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing*, Geotech Geol Eng, 2014, 32, pp. 525-546.
- RAMSTAD, R.K. *Ground source energy in crystalline bedrock – increased energy extraction by using hydraulic fracturing in boreholes*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, n° 66, 2007, 11 p.

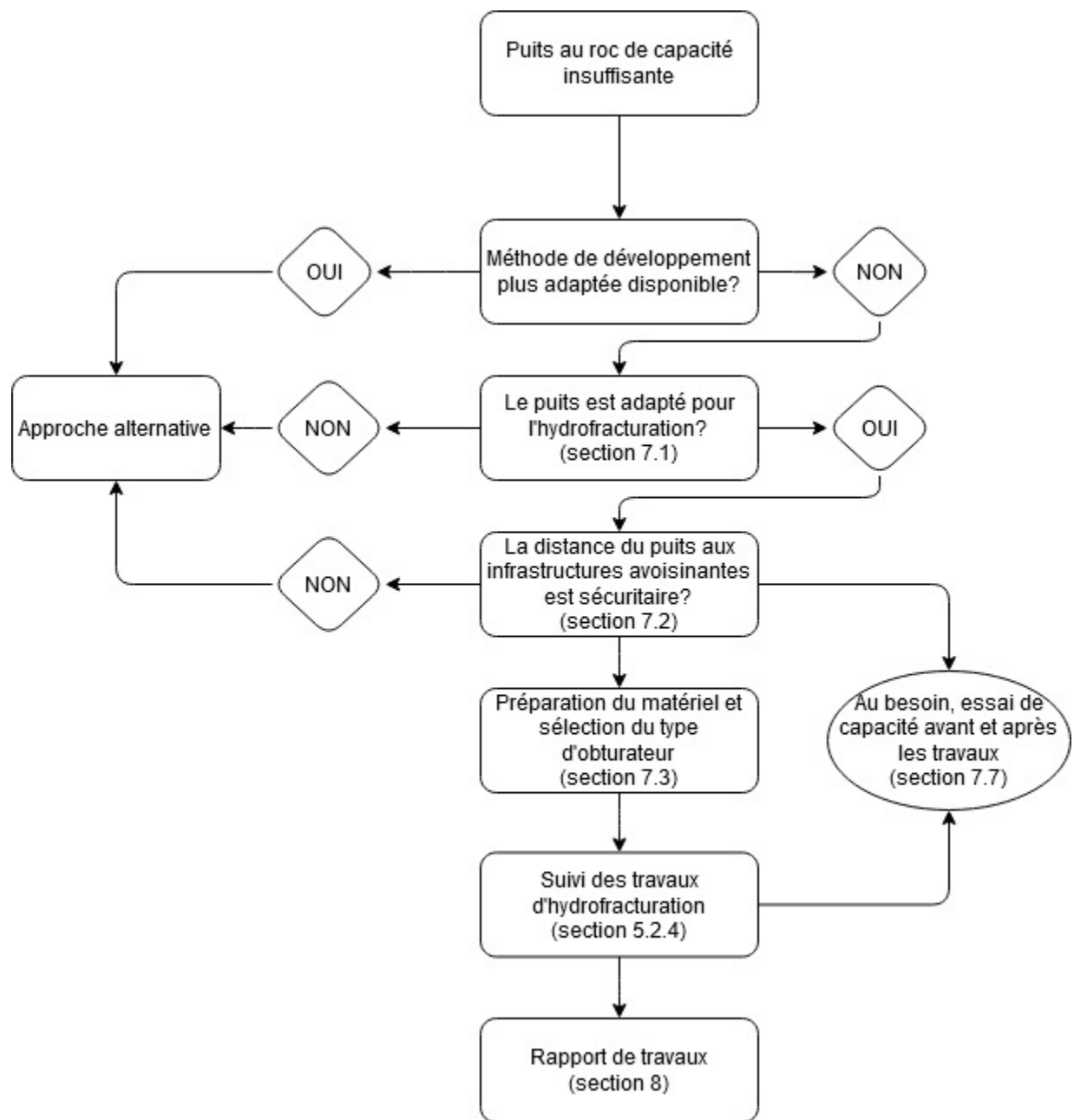
THE AMERICAN WELL OWNER. *A Quarterly Publication for Well Owners, Hydrofracture of Wells, American Ground Water Thrust* – Independent Authority on Ground Water, 2003, n° 2, 4 p.

WALTZ, J., DECKER, T.L. *Hydro-fracturing offers many benefits*, Johnson Driller's Journal, Second Quarter, Johnson Division, UOP Inc., St-Paul, MN, 1981.

WATER SYSTEMS COUNCIL. *Hydro Fracking and hydraulic fracturing-An analysis of water related state regulations impacting water wells*, National water systems council national programs office, Washington D.C., 2010. A water system council report: n° 6 in a series of special reports.

WILLIAMSON, W.H., WOOLLEY, D.R. *Hydraulic Fracturing to Improve the Yield in Bores in Fractured Rock*, Australian Water Resource Council Technical Paper, n° 55, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia, 1980.

ANNEXE





**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 