

SÉQUESTRATION GÉOLOGIQUE DU CO₂
CHAIRE DE RECHERCHE



INRS
Institut national de la recherche scientifique

**Stress actuel dans les
Basses-Terres du Saint-Laurent
à partir des élongations de puits :
implications pour le stockage du CO₂**

RAPPORT INRSCO2-2011-V2.4

par

**Elena Konstantinovskaya
et
Michel Malo**

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

2011 – Québec

R-1267

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, 490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9

Téléphone : (418) 654-2535 ; Télécopieur : (418) 654-2600 ; Site internet : chaireco2.ete.inrs.ca

Préambule

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) a octroyé une subvention à l'INRS-ETE pour mettre en place une chaire de recherche sur la séquestration géologique du CO₂ au Québec. Le décret n° 714-2008 approuvant l'octroi a été adopté le 25 juin 2008. La subvention d'une durée de cinq ans (exercices financiers 2008-2009 à 2012-2013) provient du Fonds vert. La création de la chaire s'inscrit dans l'action 20 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques intitulé « Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir ».

Les travaux de la chaire permettront d'explorer les principales options de séquestration géologique du CO₂ au Québec. Les objectifs principaux sont d'évaluer la capacité de stockage du CO₂ au Québec, de tester quelques sites pour leur potentiel de rétention du CO₂ après injection, et de former une expertise au Québec dans le domaine de la technologie du captage et de la séquestration du CO₂ (CSC). Les objectifs secondaires pour arriver à répondre aux objectifs principaux sont de: 1) faire l'inventaire des réservoirs géologiques potentiels au Québec; 2) faire l'inventaire des sources majeures d'émission de CO₂ au Québec; 3) compiler les travaux réalisés ailleurs dans le monde sur la technologie du CSC; 4) caractériser les paramètres géologiques et géophysiques des réservoirs potentiels; 5) évaluer leur capacité de stockage; 6) choisir des sites potentiels pour réaliser des essais d'injection de CO₂; 7) tester un ou deux sites avec suivi sur une période d'un à deux ans pour évaluer la capacité de rétention du CO₂ et les risques de fuite. En marge de l'atteinte des objectifs mentionnés plus haut, les travaux complémentaires concernent l'évaluation des enjeux socio-économiques de l'implantation de la technologie du CSC au Québec (lois, sécurité, etc.) et des études technico-économiques pour l'implantation d'une usine pilote.

Les cinq volets de recherche suivants permettront d'atteindre les objectifs et de réaliser les travaux complémentaires :

1. Inventaire
2. Caractérisation
3. Capacité de stockage
4. Test-pilote
5. Enjeux socio-économiques.

Le présent rapport sur le stress actuel dans les Basses-Terres du Saint-Laurent cadre dans le volet de recherche Caractérisation.

Sommaire

La direction moyenne du stress actuel maximal horizontal (S_{Hmax}) qui a été obtenue suite à l'analyse des élongations de puits (*borehole breakouts*) induites par le stress dans les Basses-Terres du Saint-Laurent est de $N59^{\circ}E \pm 20^{\circ}$. Les directions de S_{Hmax} varient du nord-est vers le sud-ouest en suivant le front des Appalaches en étant $N70^{\circ}E$ à Saint-Flavien, $N62^{\circ}E$ dans la région de Bécancour-Notre Dame, et $N35^{\circ}E$ à Saint-Simon. Les élongations de puits ont été déduites à partir des données de *caliper* à 4 branches disponibles dans les 17 puits de la région. Ces données d'élongations de puits proviennent de profondeurs entre 250 m et 4 km et caractérisent les différentes unités stratigraphiques paléozoïques de la succession de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles frontales des Appalaches du Québec. Nos résultats sont compatibles avec l'orientation NE-SO de S_{Hmax} régional qui caractérise l'Est du Canada et des États-Unis. Le but ultime d'une étude géomécanique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent est d'estimer les pressions maximales d'injection de CO_2 qui n'occasionneraient pas de formation de fractures ou de failles ou ne provoqueraient pas la réactivation des failles et des systèmes de fractures préexistants. Il faut donc déterminer les valeurs dominantes du stress actuel (direction et magnitude), la géométrie des failles et des fractures anciennes et les propriétés géomécaniques des roches (résistance, élasticité, etc.).

TABLE DES MATIÈRES

Préambule	3
Sommaire	5
1. Introduction	9
2. Méthodologie	11
3. Résultats obtenus	13
3.1. Direction du stress actuel maximal horizontal.....	13
3.2. Géométrie des failles régionales	15
3.3. Directions des paléo-stress et des systèmes de fractures associées	17
3.4. Pression des fluides dans les réservoirs de la région de Bécancour	20
3.5. Magnitude du stress actuel.....	21
4. Discussion	22
5. Conclusions	23
6. Remerciements	24
7. Références	25
ANNEXES	27
Annexe 1. Directions du stress actuel maximal horizontal dans les Basses-Terres du Saint-Laurent à partir des élongations de puits, d’après Plumb et Cox (1987).....	29
Annexe 2. Directions du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} dans les Basses-Terres du Saint-Laurent à partir des élongations de puits obtenues dans cette étude	29
Annexe 3. Les données de pression des fluides P_f dans les puits de la région de Bécancour.	31
Annexe 4. Gradient du stress vertical S_v dans les puits des Basses-Terres du Saint-Laurent.	32
Annexe 5. La magnitude du stress minimal horizontal S_{hmin} à partir des leak-off tests dans les puits des Basses-Terres du Saint-Laurent.....	32

1. Introduction

L'évaluation de la réponse géomécanique des roches réservoirs et de couverture aux différents scénarios d'injection du CO₂ et de son stockage à long-terme représente une partie nécessaire de l'étude géomécanique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. La détermination de la direction du stress actuel est une phase initiale de cette étude. L'estimation du potentiel de la rupture en cisaillement et/ou de la réactivation des failles et des fractures préexistantes suite au changement de la pression au sein du réservoir causé par l'injection du CO₂ représente l'étape suivante de cette étude.

La direction générale NE-SO du stress actuel maximal horizontal (S_{Hmax}) est reconnue dans le Nord-Est de

l'Amérique (Fig. 1) à partir des élongations de puits (*borehole breakouts*) et des mécanismes au foyer de séismes (Heidbach et al., 2008; 2010).

Les directions de S_{Hmax} dans l'Est du Canada et des États-Unis ont été déterminées par Plumb et Cox (1987) à partir des élongations de puits. Ces élongations de puits ont été évaluées dans 47 puits pour des profondeurs atteignant jusqu'à 4.5 km.

La direction moyenne de S_{Hmax} dans l'Est du Canada a été estimée par Plumb et Cox (1987) comme $N54^{\circ}E \pm 7^{\circ}$ pour des profondeurs jusqu'à 2 km (Fig. 1, Annexe 1). La direction de S_{Hmax} reste la même dans la succession sédimentaire paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent et dans les unités sédimentaires mésozoïques de la marge continentale (Plumb et Cox, 1987).

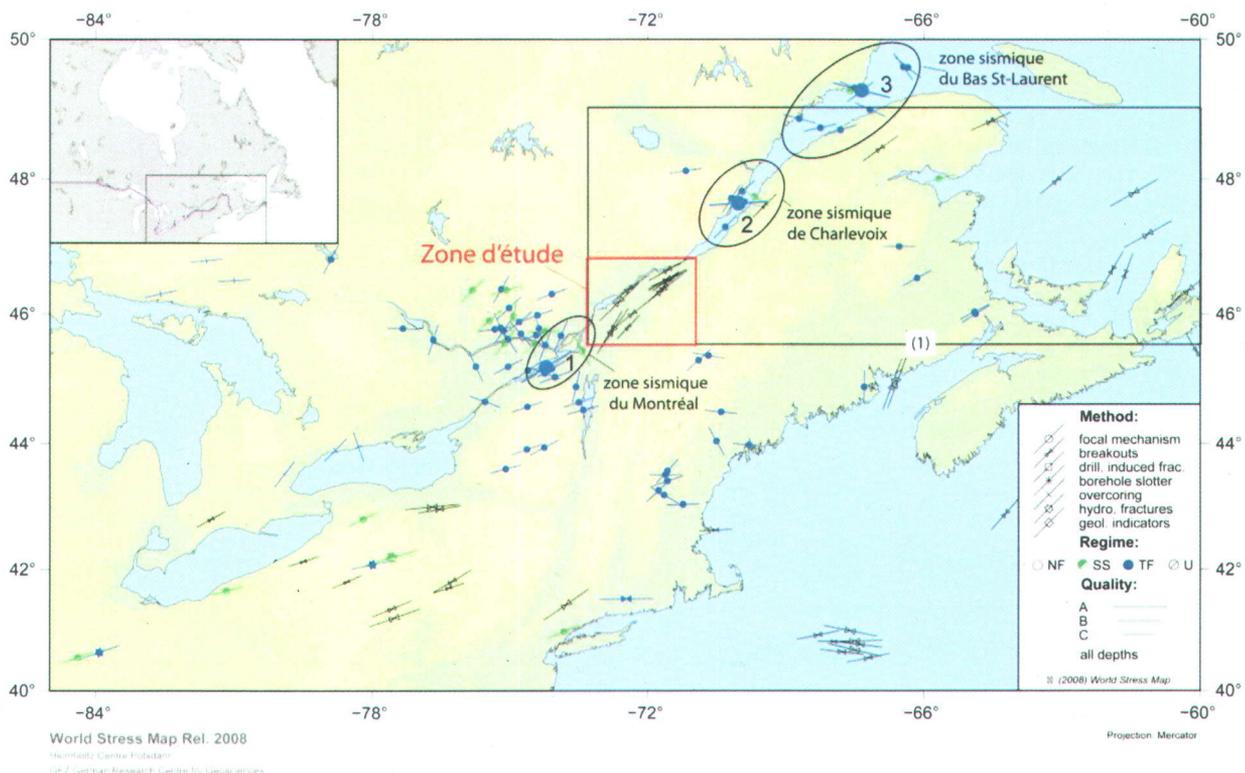


Figure 1. Carte des directions du stress maximal horizontal S_{Hmax} dans l'Est du Canada à partir des mécanismes au foyer, des élongations de puits, des fractures hydrauliques et des surcarottages, d'après Heidbach et al. (2008). Le type du régime au foyer est le suivant : NF – faille normale, SS- faille de décrochement, TF – faille inverse, U – faille non déterminée. Le rectangle (1) délimite la zone de l'Est du Canada analysée par Plumb et Cox (1987). Les symboles agrandis montrent les directions de S_{Hmax} à partir des mécanismes au foyer dans les zones sismiques: 1- de Montréal, 2 - de Charlevoix, et 3 - du Bas St-Laurent, d'après Mazzotti et Townend (2010).

Les directions du stress actuel maximal horizontal à partir des mécanismes au foyer des séismes (S_{HSmax}) ont été récemment réévaluées (Fig. 1) dans les zones sismiques de Montréal, de Charlevoix et du Bas Saint-Laurent (Mazzotti et Townend, 2010). Les directions de S_{HSmax} dans ces zones sismiques (N58° Montréal, N86° Charlevoix, N104° Bas St-Laurent) subissent une rotation dans le sens horaire (Fig. 2) par rapport aux orientations de S_{Hmax} obtenues à partir des élongations de puits dans les mêmes zones (N44°, N54° et N60°, respectivement).

Les foyers de séismes dans les zones sismiques de Montréal, de Charlevoix, et du Bas Saint-Laurent sont localisés à des profondeurs entre 5 et 25 km dans le socle grenvillien (Adams et al., 1988; Lamontagne et al., 2000; 2003). L'orientation des axes du stress actuel qui caractérise les mécanismes au foyer dans ces régions (Fig. 2) correspond à un régime de compression ou de faille inverse (Fig. 3) où le stress maximal S_1 est horizontal et le stress minimal S_3 est vertical (Mazzotti et Townend, 2010).

Toutefois, les fractures hydrauliques généralement observées dans les puits dans le Nord-Est de l'Amérique sont verticales, ce qui indique que le stress principal minimal S_3 est horizontal et l'un de deux autres stress principaux est vertical (Plumb et Cox, 1987). En d'autres mots, le régime de stress qui correspond aux fractures hydrauliques verticales doit être celui d'une faille de décrochement (stress maximal S_1 horizontal et stress moyen S_2 vertical) ou d'une faille

normale (S_1 vertical et S_2 horizontal) (Fig. 3).

La rotation de la direction du stress S_{HSmax} estimée à partir des mécanismes au foyer par rapport à la direction du stress actuel maximal horizontal déterminé à partir des élongations de puits pourrait être expliqué comme le résultat de concentration des stress liés à la remontée post-glacière dans les zones de faiblesse, par exemple les failles à faible friction (Mazzotti et Townend, 2010). Cependant, si l'on prend en considération que la direction du stress maximal horizontal et le régime tectonique déduits à partir des puits (profondeurs < 4.5 km) et à partir des mécanismes au foyer (profondeurs > 5 km) sont différents, on peut suggérer que la direction du stress S_{Hmax} et le régime tectonique varient avec la profondeur dans la couverture sédimentaire et dans le socle grenvillien.

L'estimation de la direction du stress à partir des élongations de puits est interprétée dans cette étude en relation avec la géométrie des failles régionales ce qui permet de déterminer la stabilité ou la non-stabilité des failles. Les directions des paléo-stress ont été analysées enfin de connaître les orientations des systèmes de fractures préexistantes et de déterminer la possibilité de leur réactivation. Pour pouvoir prédire si les failles ou les systèmes de fractures pourraient être réactivés suite à l'injection du CO_2 , la magnitude du stress et la résistance des roches sont estimés.

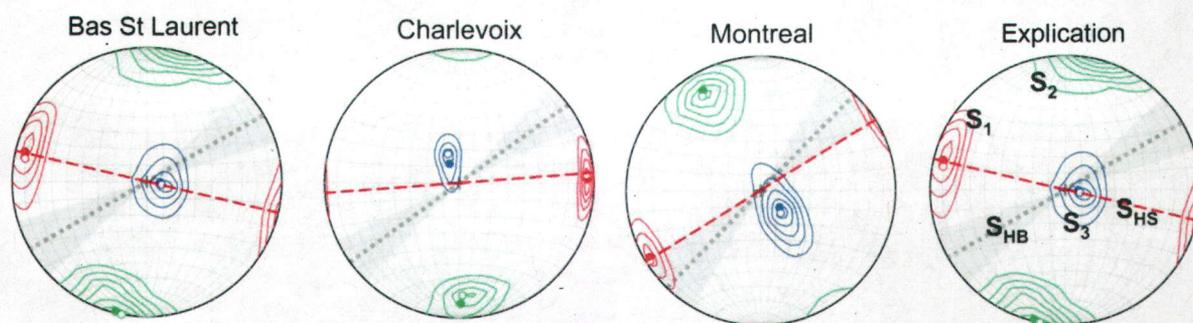


Figure 2. L'état du stress dans les zones sismiques de Montréal, de Charlevoix, et du Bas St-Laurent, d'après Mazzotti et Townend (2010). Projection sur l'hémisphère inférieur avec les axes principaux du stress (S_1 – rouge, S_2 – vert, S_3 – bleu). La ligne rouge pointillée indique l'orientation moyenne de S_{HSmax} déterminée à partir des mécanismes au foyer. La ligne grise pointillée et la zone grise indiquent la moyenne et la région de 90% de confiance du stress maximal horizontal déterminées à partir des élongations de puits.

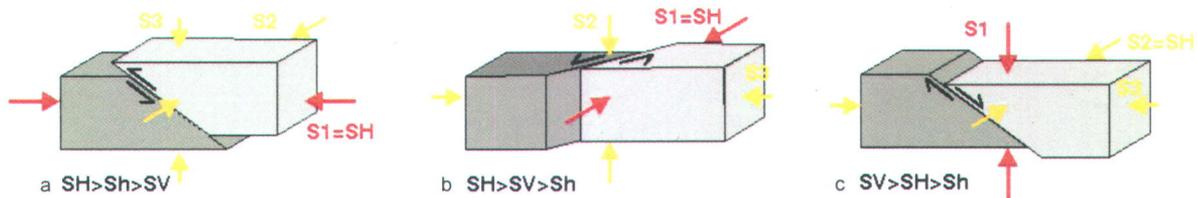


Figure 3. Régime tectonique du stress et relations entre les axes principaux du stress, d'après World Stress Map Project (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>): faille inverse (a), faille de décrochement (b), faille normale (c).

2. Méthodologie

Élongation de puits

La direction du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} est déterminée à partir des élongations de puits. Les élongations de puits représentent les zones de fracturation et d'élargissement des parois du puits (Fig. 4) produites par le stress actuel et localisées symétriquement autour de l'axe du puits (Bell et Gough, 1979).

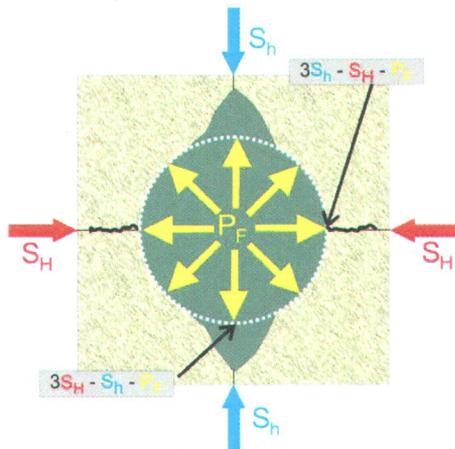


Figure 4. Relation entre l'élongation du puits et les axes principaux du stress: vue le long de l'axe du puits vers sa base, d'après Schmitt (2010).

Quand on fore un puits, le vide est créé par l'extraction du matériel. Le stress naturel ambiant se trouve alors concentré sur les parois du puits. L'élongation du puits se forme quand le stress autour du puits dépasse le stress nécessaire pour produire la fracturation des parois (Zoback et al., 1985; Bell, 1990). L'élongation du puits est causée par le développement des plans de cisaillement conjugués qui induisent la fracturation et épaufrent les parois. Autour d'un puits vertical, l'élongation est la plus importante dans la direction du

stress minimal horizontal S_{hmin} (Fig. 4). L'élongation du puits est alors perpendiculaire au stress maximal horizontal S_{Hmax} (Plumb et Hickman, 1985).

Il faut distinguer les élongations de puits (*borehole breakouts*) induites par le stress des autres types d'élargissements de puits (Fig. 5).

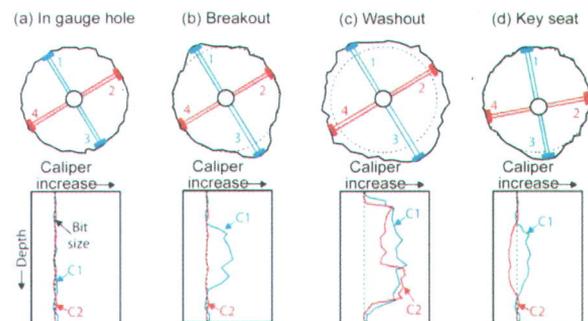


Figure 5. Les différents types d'élargissement de puits, d'après Plumb et Hickman (1985). Les caractéristiques d'élongation de puits (*borehole breakout*) induite par le stress sont présentées en (b). Sur les coupes de puits en haut : 1-4 – pattes du caliper, sur les diagraphies en bas : C1 (pattes 1-3), C2 (pattes 2-4).

On peut déterminer l'orientation de l'élongation de puits à partir des diagraphies d'images et à partir des données du caliper à 4 branches. Les détails de ces techniques sont disponibles sur le site web du World Stress Map (WSM) Project (<http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>).

Les élongations de puits dans les Basses-Terres du Saint-Laurent ont été déduites à partir des données de caliper à 4 branches disponibles dans 17 puits (Annexe 2). Ces zones de fracturation des parois de puits ont été mesurées dans des profondeurs entre 250 m et 4 km et caractérisent les différentes unités stratigraphiques paléozoïques de la succession de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles frontales des Appalaches de Québec.

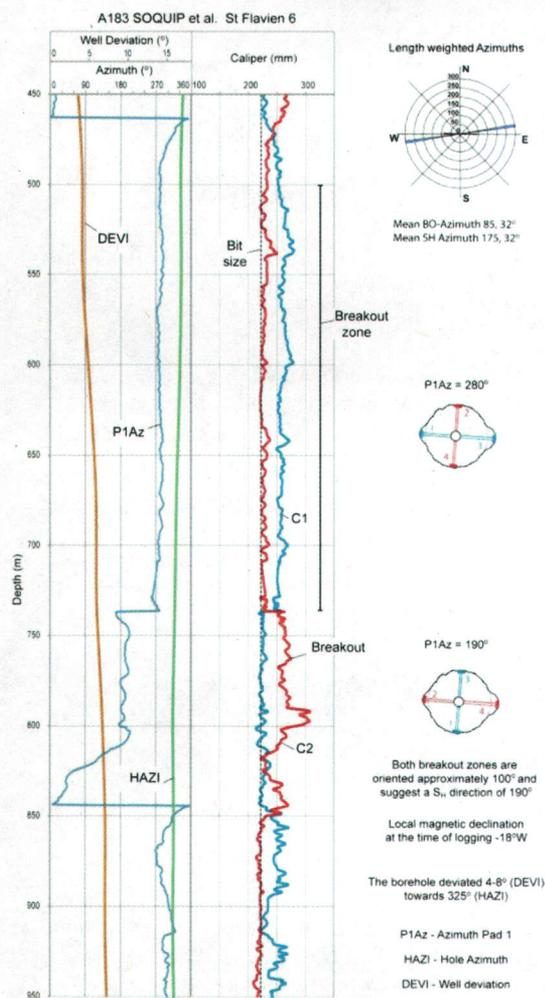


Figure 6. Exemple de l'interprétation de diagraphie de caliper à 4 branches dans le puits A180, SOQUIP et al. Saint-Flavien No 6.

Les directions mesurées à partir des données du caliper à 4 branches ont été corrigées pour la déclinaison magnétique qui était effective au moment de la prise de la diagraphie.

Ensuite, la statistique circulaire (Mardia, 1972) a été appliquée aux directions d'élongations de puits corrigées (Annexe 2). La statistique a été basée soit sur la longueur des élongations de puits (*length weighted*) soit sur le nombre des élongations par puits (*number weighted*). Les directions de S_{Hmax} ont été calculées comme orthogonales aux directions d'élongations de puits (Annexe 2).

Finalement, les données obtenues ont été qualifiées

(Annexe 2) conformément aux critères utilisés par le *WSM Project* (Sperner et al., 2003). Seulement les données des classes A-C ont été utilisées pour la construction des rosaces de S_{Hmax} (Fig. 8) et la projection sur la carte régionale (Fig. 9).

Pression réservoir

La pression réservoir (pression des fluides, P_f) est estimée pour la région de Bécancour à partir de l'analyse des données de DST faite par la compagnie FEKETE, Calgary, Alberta (Annexe 3, Brunner et al., 2010).

La magnitude du stress vertical S_v

La magnitude du stress vertical S_v est calculée par l'intégration des données de densité disponibles dans les diagraphies pour l'intervalle de la surface jusqu'à la profondeur z intéressée (Zoback et al., 2003) :

$$S_v = \int_0^z \rho(z)g dz \approx \bar{\rho}gz$$

où $\rho(z)$ – densité en fonction de profondeur, g – accélération gravitaire, $\bar{\rho}$ – densité moyenne de la colonne de roches.

Les diagraphies de densité ont souvent été enregistrées à partir de 150-500 m ou plus. Dans ces cas, la courbe de densité a été extrapolée du début de la prise des mesures de densité jusqu'à la surface (Fig. 17). Les valeurs de densité dans les parties de puits élargies (*washouts*) montrent une tendance à diminuer. Les courbes de densité dans ces endroits ont été également corrigées.

La magnitude du stress minimal horizontal S_{Hmin}

La magnitude du stress minimal horizontal S_{Hmin} est estimée à partir des *leak-off tests* (Zoback et al., 2003; voir section 3.5).

La résistance des roches

La résistance des roches (UCS – *uniaxial compressive strength*, Fig. 7) sera déduite à partir des données des diagraphies acoustiques et/ou de porosité-densité pour les différentes lithologies : grès, shales, calcaires et dolomies.

Les échantillons de carottes de la région de Bécancour des roches réservoirs et de couverture de la succession sédimentaire de la plate-forme du Saint-Laurent ont été envoyés au laboratoire pour des tests de stress en compression triaxiale (Fig. 7), et des mesures des modules d'élasticité et de Young. Ces données vont compléter ou corriger les estimations du stress en

compression uniaxiale UCS à partir des diagraphies.

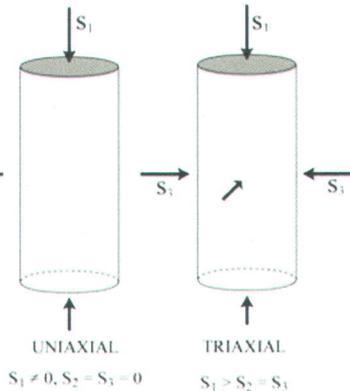


Figure 7. L'orientation des axes principaux du stress pendant les tests de stress de compression : uniaxiale UCS (à gauche) et triaxiale (à droite).

La magnitude du stress maximal horizontal S_{Hmax}

Les données de forage (densité et composition de la boue, casing, leak-off et formation integrity tests, alésage, inflow et kick gaz, taux de pénétration, etc.) ont été compilées par jour de forage à partir des rapports journaliers pour les puits dans lesquels l'orientation du S_{Hmax} a été déterminée.

La magnitude de S_{Hmax} sera modélisée à partir des élongations de puits vues avec le caliper à 4 branches ou en images en tenant compte de plusieurs autres

données : valeurs S_v et S_{hmin} , pression de la boue, pression réservoir, résistance des roches, événements de forage, déviations des puits, etc. D.A. Castillo (Baker Hughes, Reservoir Development Services, Geomechanics, USA) collaborera avec nous en utilisant un logiciel dédié à faire ces calculs et en suivant la méthode décrite par Zoback et al. (2003).

3. Résultats obtenus

3.1. Direction du stress actuel maximal horizontal

La direction moyenne du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} (Fig. 8) obtenu à partir des élongations de puits induites par le stress dans la succession sédimentaire paléozoïque dans les Basses-Terres du Saint-Laurent est orientée $N59^{\circ}E \pm 20^{\circ}$ (Konstantinovskaya et al., 2010b).

Cette valeur est similaire à la direction de S_{Hmax} $N54^{\circ}E \pm 7^{\circ}$ (Fig. 8) obtenue à partir des élongations de puits pour l'Est du Canada par Plumb et Cox (1987).

Les directions de S_{Hmax} varient du nord-est vers le sud-ouest en suivant le front des Appalaches (Fig. 9). Ces données ont été regroupées pour trois régions, Saint-Flavien ($N70^{\circ}E$), Bécancour-Notre Dame ($N62^{\circ}E$) et Saint Simon ($N35^{\circ}E$), pour lesquelles les rosaces de direction S_{Hmax} ont été construites (Fig. 8).

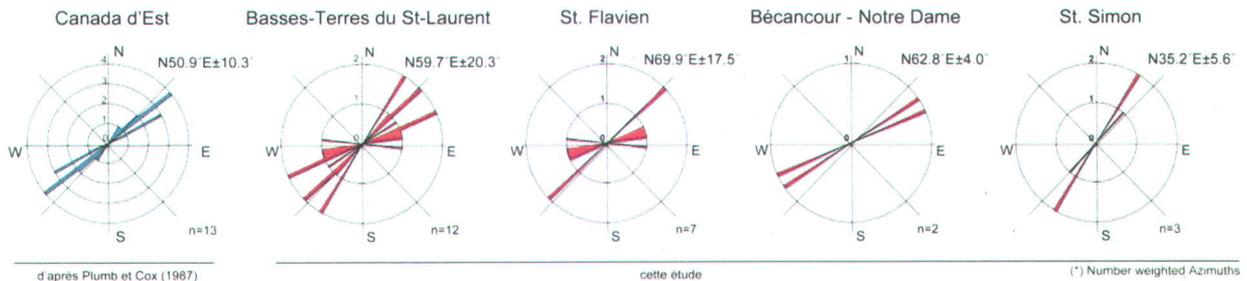


Figure 8. Rosaces de direction du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} obtenues à partir des élongations de puits dans la succession sédimentaire paléozoïque de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles tectoniques des Appalaches du Québec. Les données de cette étude sont en rouge, celles de Plumb et Cox (1987) sont en bleu. Les données de cette étude sont présentées pour l'ensemble des Basses-Terres du Saint-Laurent et sont regroupées pour trois régions : Saint-Flavien, Bécancour-Notre Dame et Saint-Simon. Voir le texte et l'Annexe 2 pour les détails.

3.2. Géométrie des failles régionales

Le socle grenvillien et les unités sédimentaires de la plate-forme du Saint-Laurent sont affectés par une série de failles normales (Fig. 10) s'étendant du sud-ouest vers le nord-est et inclinées vers le sud-est (Fig. 9) (Séjourné et al., 2003; Castonguay et al., 2006; Konstantinovskaya et al., 2009).

Ces failles normales sont interprétées comme les failles

du rift initiées dans l'océan Iapetus au Protérozoïque-Cambrien précoce (Rankin, 1976; Thomas, 2006; Cawood et al., 2001; Hibbard et al., 2007). Elles sont restées actives pendant l'ouverture de l'océan et ont ensuite été réactivées aux différentes phases tectoniques syn- et post-taconiennes lors de l'emplacement des écaïlles allochtones des Appalaches du Québec (St-Julien et Hubert, 1975; Globensky, 1987; Lavoie, 1994; Lemieux et al., 2003).

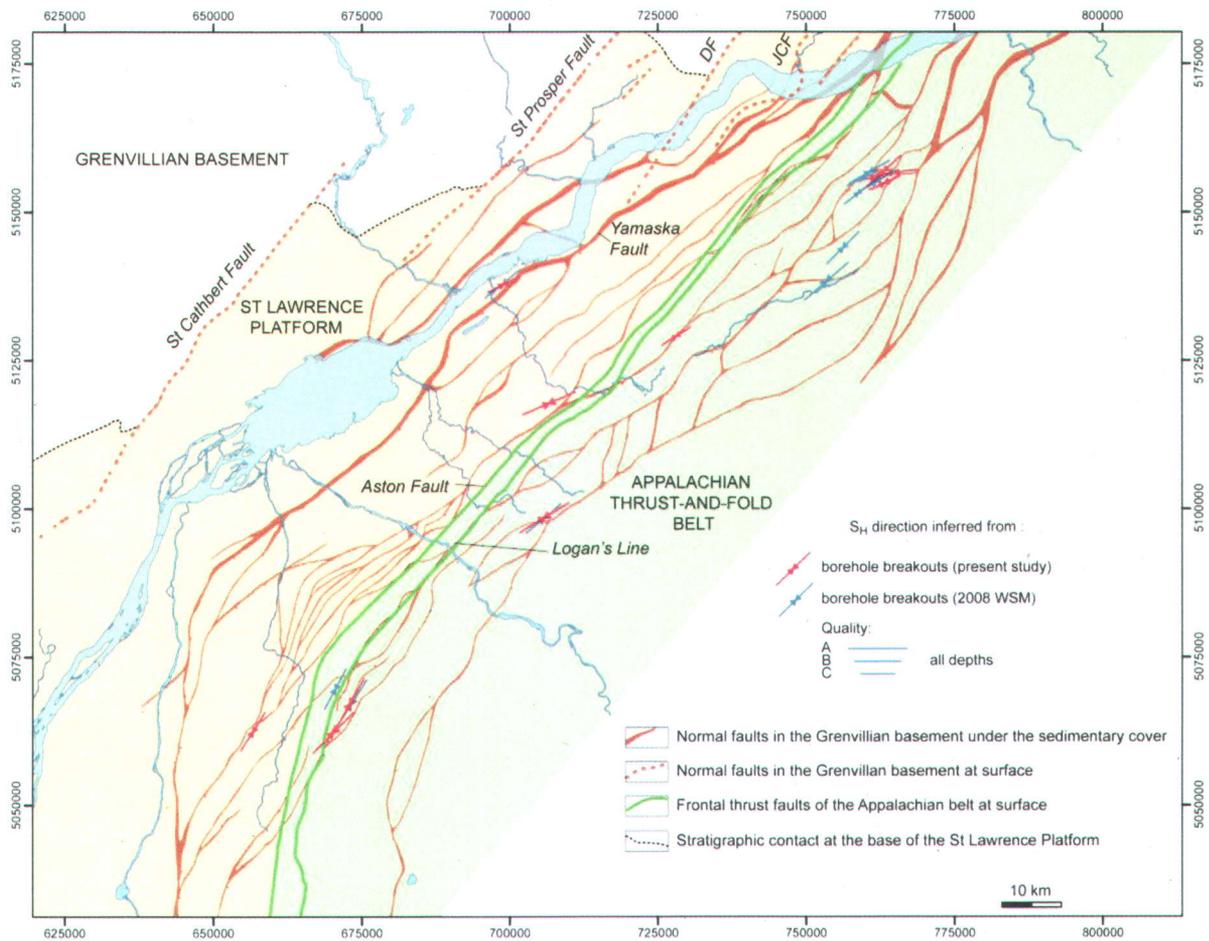


Figure 10. Carte des failles normales dans le socle grenvillien en profondeur (lignes pleines de couleur marron) et en surface (lignes pointillées de couleur marron) et des chevauchements frontaux des Appalaches de Québec (lignes vertes), d'après Thériault et al. (2005) et Globensky (1987). Certaines failles normales dans le socle (y compris la faille de Yamaska) ont été réactivées comme les failles inverses à la fin de l'orogénèse taconienne ou plus tard. Les flèches en couleur montrent les directions du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} obtenues à partir des élongations de puits dans la succession sédimentaire paléozoïque de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles tectoniques des Appalaches du Québec (Fig. 9).

Les failles normales dans le socle remontent dans la couverture sédimentaire jusqu'à la base du Groupe de Lorraine (Fig. 9, profils) et elles sont souvent interprétées comme des failles de croissance (ou syn-sédimentaires) car elles contrôlent l'épaisseur des séries de la plate-forme du Saint-Laurent. La réactivation de ces failles normales est probablement liée à l'emplacement et la charge des écailles tectoniques empilées au front des Appalaches (Séjourné et al., 2003; Konstantinovskaya et al., 2009). Certaines des failles normales ont été réactivées comme des failles inverses à la fin de l'orogénèse taconienne ou plus tard (Faure et al., 2004; Konstantinovskaya et al., 2009; Konstantinovskaya et al., 2010a). L'un de ces exemples est la faille normale régionale de Yamaska qui longe la rive sud du fleuve Saint-Laurent (Fig. 10). Cette faille a été réactivée (Fig. 9, profils) comme une faille inverse (Konstantinovskaya et al., 2010a).

d'Aston) et les chevauchements qui délimitent les écailles frontales des Appalaches sont étendues généralement NE-SO et deviennent NNE-SSO dans la région de Montréal (Fig. 10). Les écailles de chevauchement frontales sont observées dans les séries sédimentaires de la plate-forme du Saint-Laurent au NO de faille d'Aston (Fig. 9, profils) indiquant que le front de déformation lié à l'orogénèse taconienne affecte les unités du bassin d'avant-pays (Konstantinovskaya et al., 2009).

Les failles régionales normales et inverses qui affectent la succession sédimentaire de la plate-forme du Saint-Laurent sont orientées à 15-20° par rapport aux directions du stress actuel maximal horizontal (Fig. 10). Cette situation structurale est favorable à la réactivation des failles en régime de décrochement dextre si les pressions de réservoir maximales pendant l'injection du CO₂ sont atteintes.

Les failles inverses régionales (Ligne Logan, faille

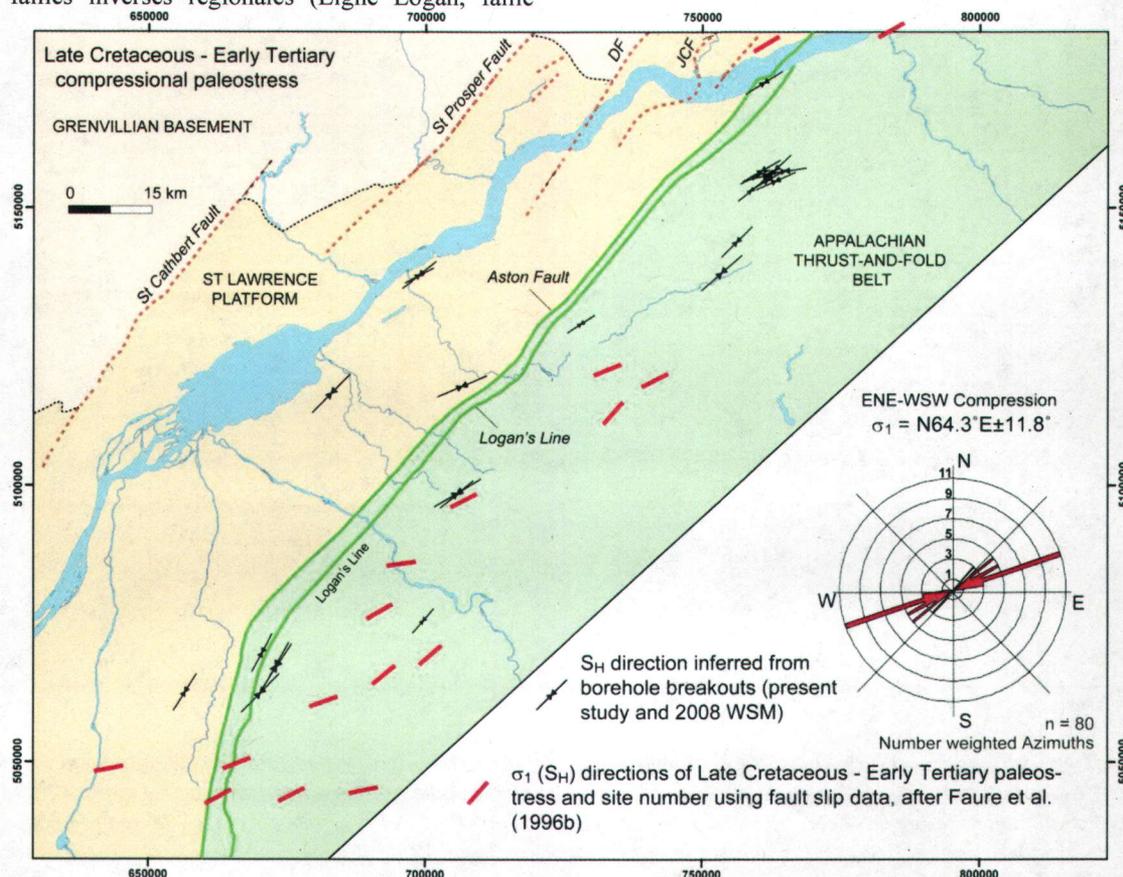


Figure 11. Les directions σ_1 du paléo-stress en compression au Crétacé tardif – Tertiaire précoce, d'après Faure et al. (1996b). Les flèches noires montrent les directions du stress actuel S_{Hmax} à partir des elongations de puits.

3.3. Directions des paléo-stress et des systèmes de fractures associées

Les directions du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} dans la succession sédimentaire de la plate-forme du Saint-Laurent et dans les écaïlles frontales des

Appalaches de Québec sont alignées parallèlement aux orientations de l'axe principal σ_1 du stress en compression inhérent à la phase tectonique du Crétacé tardif-Tertiaire précoce (post-montérégienne) dans cette région (Fig. 11) sans changement depuis cette époque.

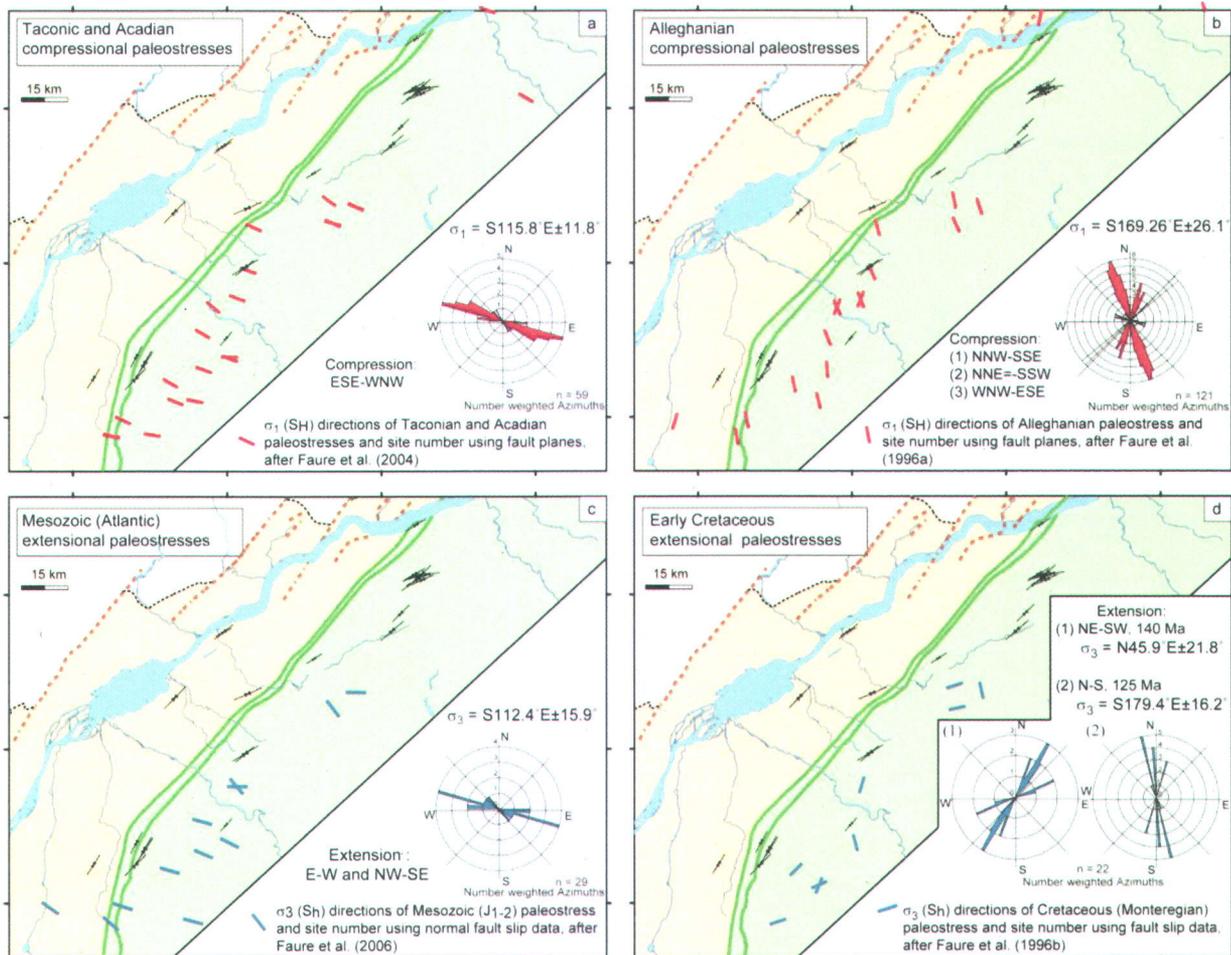


Figure 12. Les directions de l'axe principal σ_1 axes de paléo-stress pendant les phases tectoniques de compression taconienne-acadienne (a) et alléghanienne (b) et les directions de l'axe principal σ_3 pendant les phases tectoniques d'extension du Mésozoïque (c) et du Crétacé précoce (d). D'après Faure et al. (1996a, b; 2004; 2006). Les flèches noires montrent les directions du stress actuel S_{Hmax} à partir des élongations de puits (Fig. 9).

Les orientations de l'axe principal σ_1 du stress pendant les phases tectoniques de compression taconienne-acadienne et alléghanienne sont orthogonales ou fortement obliques par rapport aux directions du S_{Hmax} actuel dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Fig. 12a, b). Pendant les deux phases d'extension dans la région (Jurassic ou Atlantique et Crétacé précoce),

l'axe principal σ_1 du stress était subvertical (Fig. 12c, d).

Les orientations de paléo-stress ont contrôlé la formation des anciens systèmes de failles et de fractures dans les séries sédimentaires de la plate-forme du Saint-Laurent. Ces failles et fractures pourraient

représenter des zones de faiblesse et être réactivées suite à l'augmentation de la pression dans les réservoirs pendant l'injection du CO₂ s'ils sont orientés favorablement par rapport au stress actuel principal S_{Hmax} .

Les phases de raccourcissement taconienne-acadienne et alléghanienne sont caractérisées par des axes principaux σ_1 et σ_2 horizontaux des paléo-stress et un axe principal σ_3 vertical, ce qui aurait engendré des

fractures d'extension subhorizontales et des fractures de cisaillement conjuguées à pendage de 30° (Fig. 13a).

Les fractures d'extension subhorizontales sont moins susceptibles d'être réactivées vu l'épaisseur importante de la succession sédimentaire de la plate-forme du Saint-Laurent (voir Magnitude du stress vertical) et elles sont moins propices pour la migration du CO₂ vers la surface.

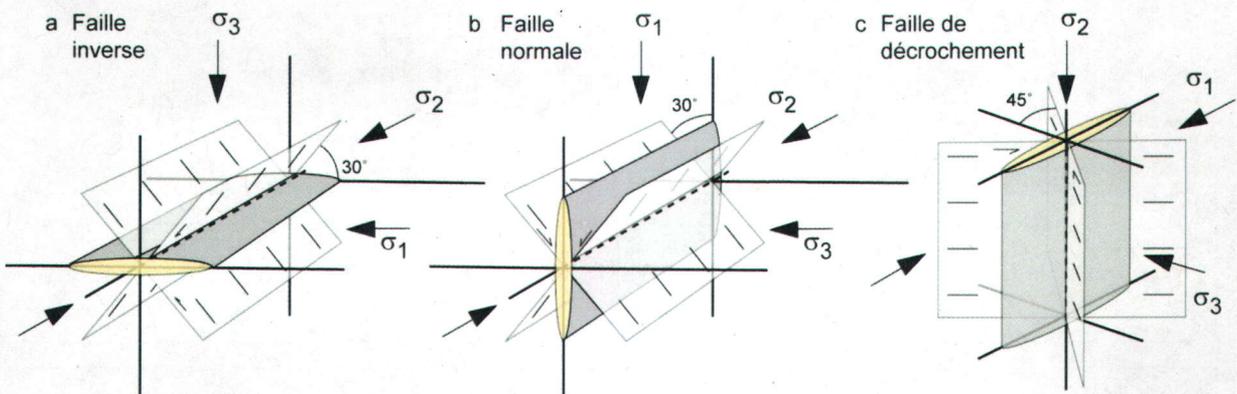


Figure 13. L'orientation des fractures d'extension et des fractures de cisaillement conjuguées par rapport aux directions des axes principaux du stress.

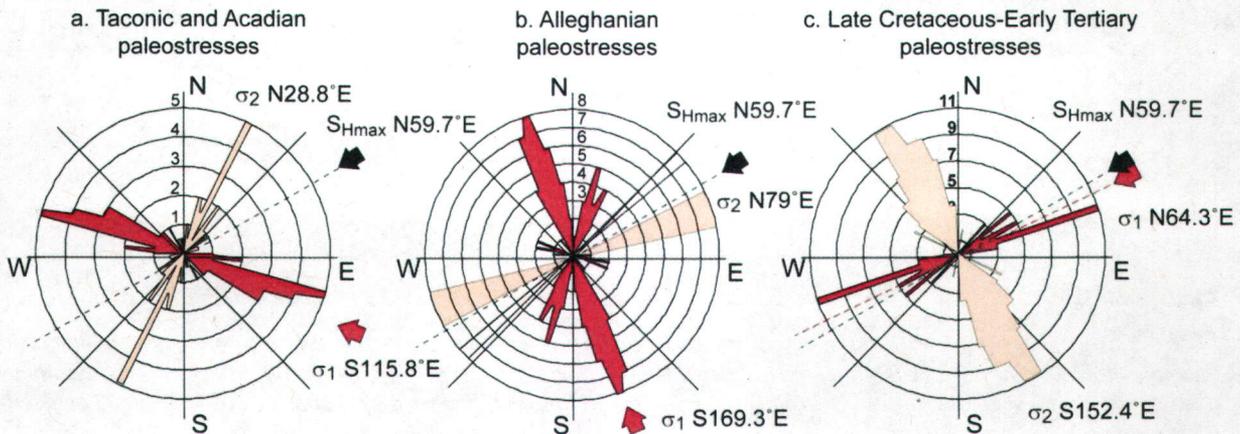


Figure 14. Les directions des axes principaux σ_1 (segments et flèches rouges) et σ_2 (segments roses) des paléo-stress des phases tectoniques de compression taconienne-acadienne (a), alléghanienne (b), et Crétacé tardif-Tertiaire précoce, post-montérégienne (c) d'après Faure et al. (1996a, b; 2004), et la direction moyenne du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} (flèche noire) (Fig. 8). Les directions de σ_2 correspondent aux directions des fractures d'extension horizontales et des fractures conjuguées de cisaillement à pendage de 30° qui auraient pu être formées lors des phases tectoniques respectives.

Les fractures de cisaillement conjuguées qui auraient pu être formées pendant les phases tectoniques taconienne-acadienne et alléghanienne auraient un pendage de 30° et des directions NNE (phase taconienne-acadienne) et ENE (phase alléghanienne) (Fig. 14a, b). Elles seraient obliques ou subparallèles à la direction moyenne du stress actuel S_{Hmax} et donc moins favorables à être réactivées.

Les directions de l'axe principal σ_1 du paléo-stress de compression au Crétacé tardif-Tertiaire précoce (post-montérégien) sont subparallèles à la direction moyenne du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} (Fig. 14c). Les fractures conjuguées de cisaillement qui auraient pu être formées sous ce paléo-stress auraient un pendage de 30° (Fig. 13a) et seraient orthogonales à S_{Hmax} (Fig. 14c). Elles seraient donc susceptibles d'être réactivées en mouvement inverse dans le champ du stress actuel.

Les phases tectoniques d'extension au Jurassique et au Crétacé précoce sont caractérisées par des axes principaux σ_1 verticaux et σ_2 et σ_3 horizontaux (Fig. 12c, d) qui engendreraient des fractures d'extension verticales et des fractures conjuguées de cisaillement à pendage de 60° (Fig. 13c).

Les directions des fractures d'extension verticales du paléo-stress au Crétacé précoce à 125 Ma sont orientées à 30° par rapport au S_{Hmax} actuel (Fig. 15c). Ces fractures pourraient être réactivées en mouvement de cisaillement senestre. Par contre, les fractures d'extension verticales du paléo-stress du Jurassique et celui du Crétacé précoce à 140 Ma sont plus fortement obliques par rapport à S_{Hmax} actuel (Fig. 15a, b) et elles resteraient plus probablement fermées sous le stress actuel.

Les plans de fractures de cisaillement NO-SE à pendage de 60° de la phase tectonique à 140 Ma sont sub-orthogonaux à la direction moyenne de S_{Hmax} et pourraient être réactivées en mouvement inverse (Fig. 15). Les fractures de cisaillement du paléo-stress Mésozoïque et à 125 Ma sont obliques à S_{Hmax} actuel (Fig. 15) et elles sont moins susceptibles d'être réactivées.

Ainsi, les fractures d'extension verticales O-E et les fractures conjuguées de cisaillement NO-SE à pendage 30° et 60° inhérentes aux paléo-stresses sont orientées favorablement pour être réactivées dans le champ du stress actuel S_{Hmax} d'orientation N59.7°E.

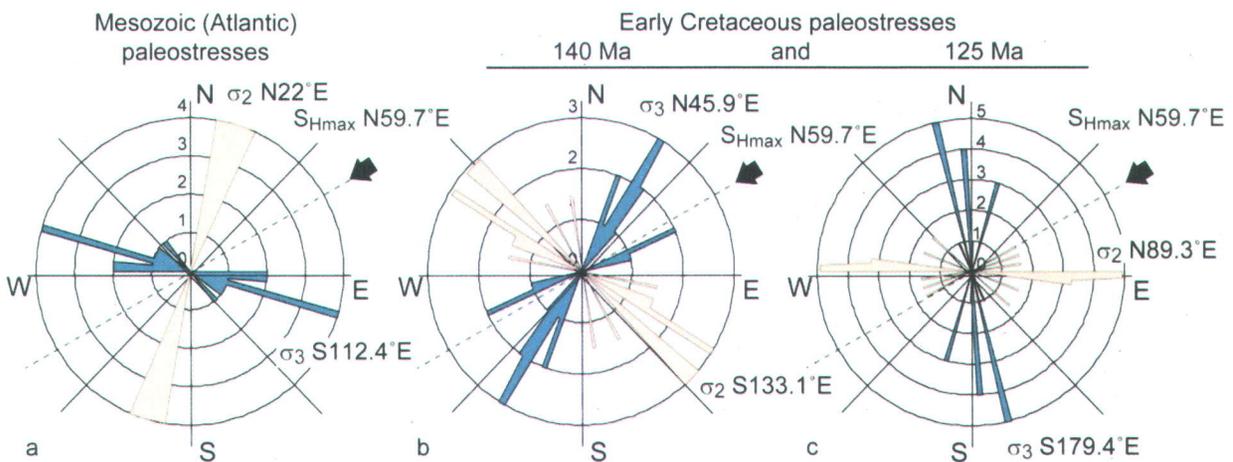


Figure 15. Les directions des axes principaux σ_3 (en bleu) et σ_2 (en rose) des paléo-stress en extension des phases tectoniques Jurassique (Atlantique) (a) et du Crétacé précoce (b, c) d'après Faure et al. (1996b; 2006) et la direction moyenne du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} (flèche noire). Les directions de σ_2 correspondent aux directions des plans de fractures d'extension verticales et de fractures conjuguées de cisaillement à pendage 60° qui auraient pu être formées lors des phases tectoniques anciennes.

3.4. Pression des fluides dans les réservoirs de la région de Bécancour

La pression des fluides (P_f) dans les réservoirs de la région de Bécancour (Annexe 3) a été déterminée à partir des données de DST (*drill stem test*) par FEKETE (Brunner et al., 2010).

Le gradient de P_f dans les réservoirs varie entre 11.76

et 12.5 kPa/m (Fig. 16). Ces valeurs du gradient de P_f sont compatibles avec les valeurs du gradient de la pression hydrostatique calculées à partir de la densité des saumures 1.18-1.29 g/cm³, qui sont caractéristiques pour la région de Bécancour. Le gradient P_f dans le site de Sainte-Angèle (puits A158) est plus élevé 15.4-15.5 kPa/m (Fig. 16, Annexe 3) probablement dû à la présence d'un réservoir local.

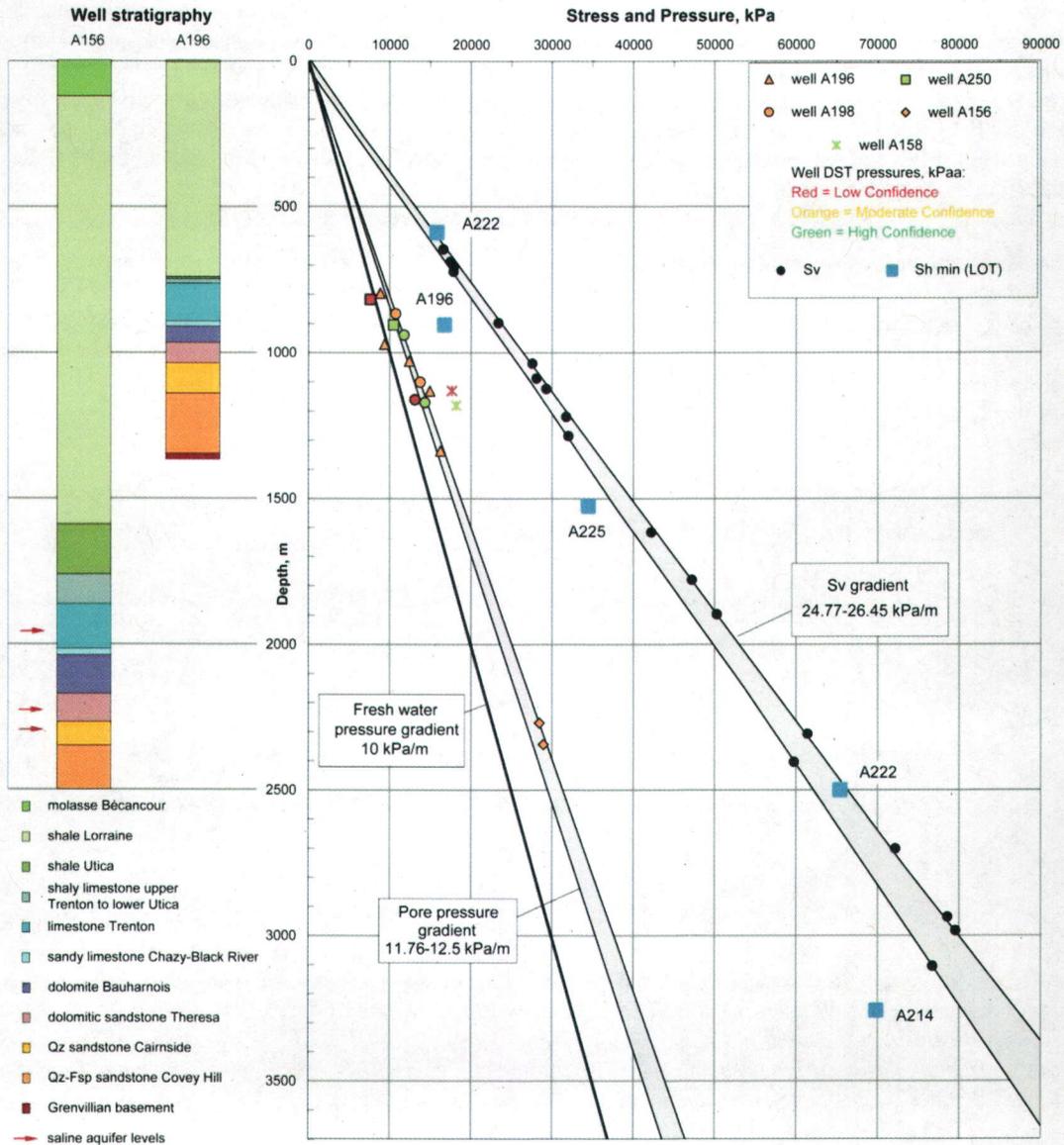


Figure 16. Diagramme représentant la stratigraphie de deux puits, la pression des fluides P_f , le stress vertical S_v , et le stress horizontal minimal S_{hmin} dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, d'après Konstantinovskaya et al. (2011).

3.5. Magnitude du stress actuel

La magnitude du stress vertical S_v (Fig. 17) a été calculée dans les puits étudiés à partir des diagraphies de densité (voir la section de Méthodologie). S_v varie

entre 77 et 102 MPa à la profondeur maximale (3-4 km) des élongations de puits dans la région.

Le gradient du stress vertical S_v varie entre 24.8 kPa/m et 26.5 kPa/m avec la moyenne 25.6 kPa (Fig. 16, Annexe 4).

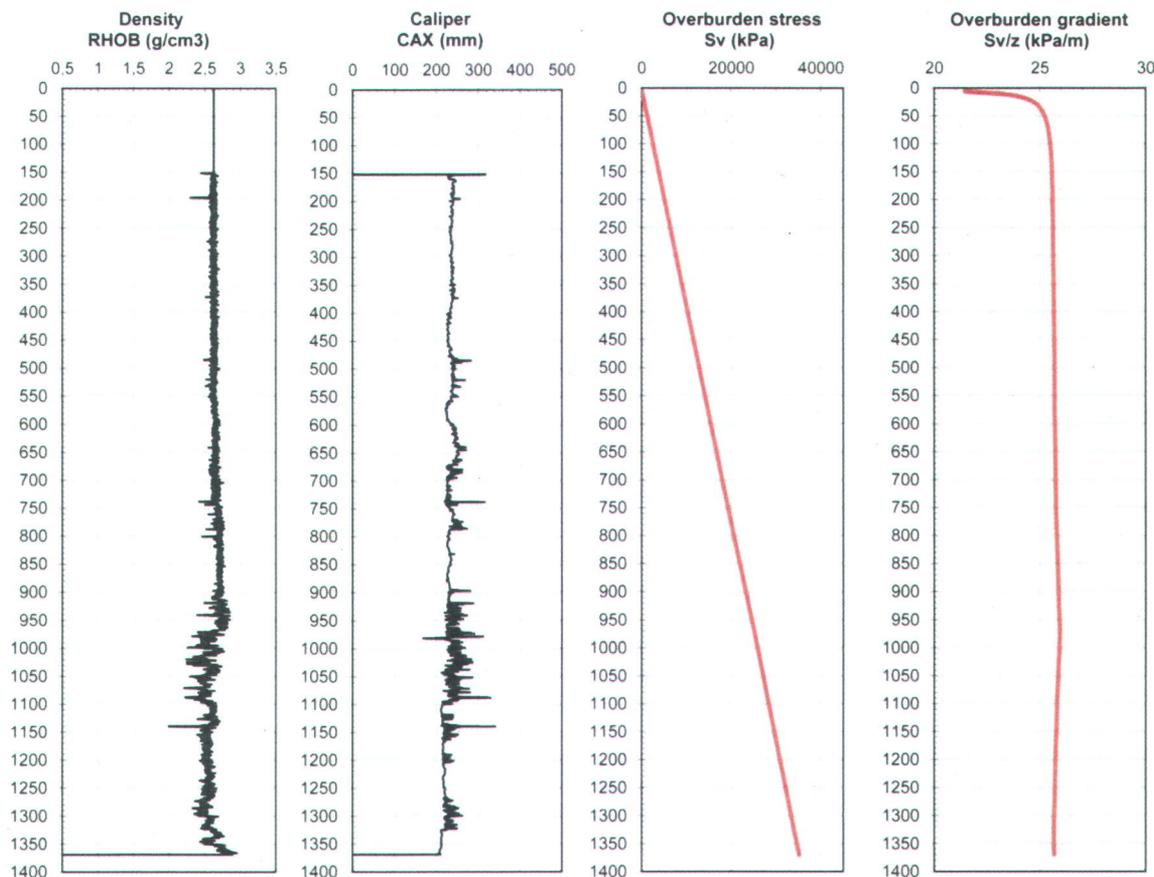


Figure 17. Diagrammes de la densité globale, du caliper, du stress vertical S_v , et de son gradient (25.73 kPa/m) calculés à partir de la diagraphie de densité dans le puits A196 SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 1. Les valeurs de densité sont extrapolées pour les profondeurs 0-150 m.

Le stress horizontal S_{hmin} a été calculé à partir des données de *leak-off test* (LOT) (Fig. 19, Annexe 5). Si le point de *leak-off* (LOP) a été atteint lors de LOT (Fig. 18), on peut considérer la pression LOP comme mesure approximative du stress minimal horizontal (Zoback et al., 2003).

Les valeurs de *leak-off pressure* ont été calculées avec les formules :

$$LOP = HP + SAP, \text{ où}$$

LOP – *leak-off pressure*, HP – pression hydrostatique des boues, SAP – pression appliquée à surface.

$$HP = MW * g * z, \text{ où}$$

MW – poids des boues (kg/m^3), g – accélération gravitaire (m/s^2), z – profondeur TVD (m). Les données du poids des boues à la profondeur des LOT ont été compilées à partir des rapports journaliers de forage.

Si l'on considère les variations de pression des fluides P_f , du stress vertical S_v et du stress minimal horizontal S_{hmin} en profondeur (Fig. 16), on peut conclure que les valeurs de magnitude de S_{hmin} sont légèrement inférieures aux valeurs de S_v pour les Basses-Terres du Saint-Laurent.

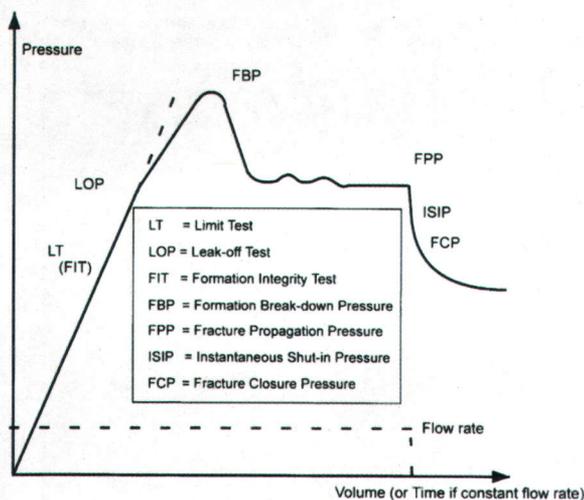


Figure 18. Illustration schématique de variations de pression appliquées en surface avec le temps lors du leak-off test, d'après Zoback et al. (2003). LOP – leak-off point où l'augmentation linéaire de pression est déviée de la ligne droite et la fracture hydraulique se forme.

4. Discussion

Les estimations préliminaires des magnitudes du stress vertical S_v et du stress minimal S_{hmin} (Fig. 16) peuvent être utilisées pour caractériser le régime tectonique actuel dans les Basses-Terres du Saint-Laurent.

On peut considérer les magnitudes du stress maximal S_1 , intermédiaire S_2 et minimal S_3 dans les termes de S_v , S_{Hmax} et S_{hmin} (Fig. 3) comme c'était initialement proposé par Anderson (1951). Dans le régime tectonique d'extension où les failles normales se forment, $S_1 = S_v$ et $S_2 \geq S_{Hmax} \geq S_{hmin}$. Dans le régime de compression où les failles inverses se forment, et $S_3 = S_v$ et $S_{Hmax} \geq S_{hmin} \geq S_v$, alors que dans le régime de décrochement, $S_2 = S_v$ et $S_{Hmax} \geq S_v \geq S_{hmin}$.

Ainsi, les relations possibles entre les magnitudes du

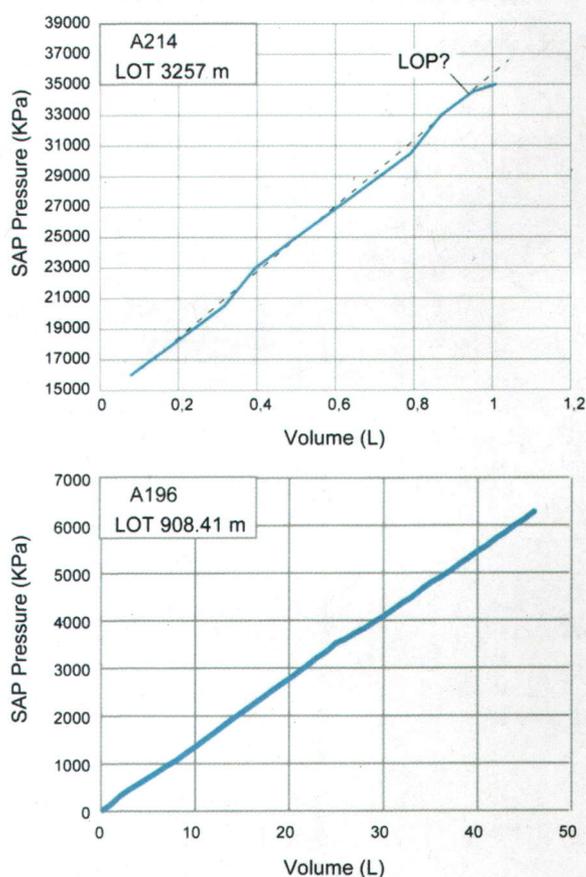


Figure 19. Les données de leak-off test (LOT) dans les puits A214, BVI et al., Saint-Simon No 1 et A196, SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 1.

stress varie en profondeur (Fig. 20) en fonction du type de régime tectonique, celui d'extension, de compression ou de décrochement (Zoback et al., 2003).

Comme $S_v \geq S_{hmin}$ et que leurs magnitudes restent très proches dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Fig. 16), on peut conclure que l'état du stress actuel de la région est celui d'un régime tectonique de décrochement (Fig. 20b). L'estimation de la magnitude du stress maximal horizontal S_{Hmax} permettra d'apporter une conclusion définitive.

Si la suggestion que le régime tectonique actuel soit celui d'une tectonique de décrochement se confirme, les fractures d'extension verticales orientées NE-SO (parallèles à S_{Hmax}) pourraient se former dans le champ du stress actuel (Fig. 10) en cas d'augmentation de pression suite à l'injection du CO_2 . Ces fractures d'extension représenteraient le plus grand risque du

point de vue de la possibilité de migration du CO₂ injecté vers la surface étant orientées et ouvertes

parallèlement à l'axe vertical du stress intermédiaire σ_2 (Fig. 13, SS).

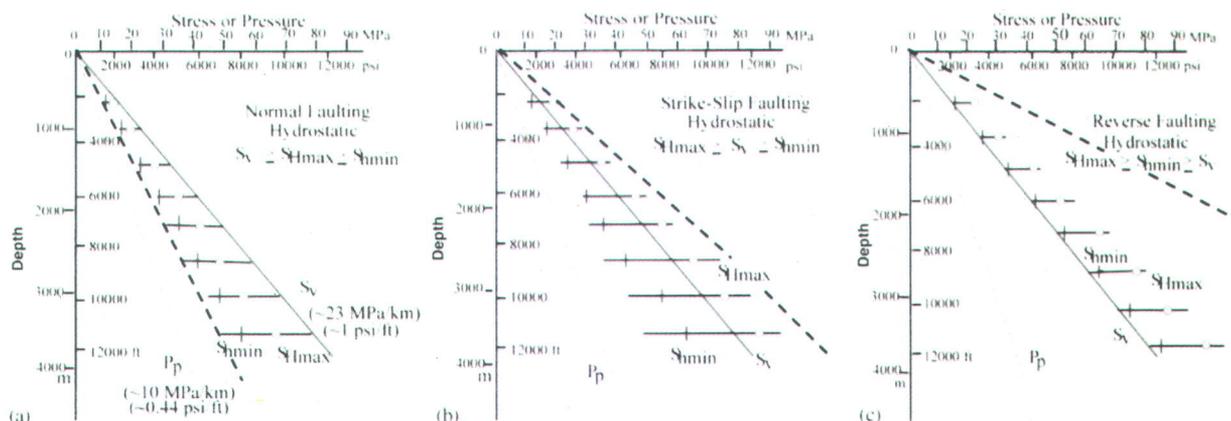


Figure 20. Les relations possibles entre les magnitudes du stress en profondeur pour les régimes tectoniques d'extension (a), de décrochement (b) et de compression (c) pour la pression des fluides (P_p) proche de la pression hydrostatique, d'après Zoback et al. (2003).

5. Conclusions

La direction moyenne du stress actuel maximal horizontal (S_{Hmax}) dans les Basses-Terres du Saint-Laurent est de $N59^\circ E \pm 20^\circ$. Les directions de S_{Hmax} varient du nord-est vers le sud-ouest en suivant le front des Appalaches en étant $N70^\circ E$ à Saint-Flavien, $N62^\circ E$ dans la région de Bécancour-Notre Dame et $N35^\circ E$ à Saint-Simon.

Les directions du stress S_{Hmax} ont été obtenues à partir d'analyse des élongations de puits (*borehole breakouts*) induites par le stress. Les élongations de puits ont été obtenues à partir des données de caliper à 4 branches dans 17 puits de la région. Ces zones de fracturation des parois de puits se trouvent dans des profondeurs variant entre 250 m et 4 km et caractérisent les différentes unités stratigraphiques paléozoïques de la succession de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles frontales des Appalaches de Québec.

Les résultats obtenus dans cette étude sont compatibles avec les directions NE-SO du S_{Hmax} régional qui caractérisent l'Est du Canada et les États-Unis.

Les failles régionales normales et inverses qui affectent la succession paléozoïque de la plate-forme du Saint-Laurent sont généralement orientées NE-SO à $15-20^\circ$ par rapport aux directions du stress actuel maximal horizontal. Cette situation structurale est favorable à la

réactivation des failles en régime de décrochement dextre si les pressions maximales des fluides des réservoirs pendant l'injection du CO₂ sont atteintes.

Les fractures d'extension verticales O-E et les fractures conjuguées de cisaillement à pendage de 30° et 60° de direction NO-SE formées lors des phases tectoniques antérieures sont orientées favorablement pour être réactivées sous le champ du stress actuel avec un S_{Hmax} d'orientation $N59.7^\circ E$.

Les premières estimations de la magnitude du stress vertical, du stress minimal horizontal et de la pression des fluides en profondeur permettent de conclure que ce soit plutôt un régime tectonique de décrochement qui pourrait caractériser l'état du stress actuel dans les Basses-Terres du Saint-Laurent.

Les fractures d'extension néoformées dans le champ du stress actuel lors de l'injection du CO₂ représenteraient le plus grand risque du point de vue des possibilités de migration vers la surface du CO₂ injecté, parce qu'elles sont orientées et ouvertes parallèlement à l'axe vertical du stress intermédiaire $S_2 = S_v$.

Les estimations du stress actuel maximal horizontal et les données des propriétés élastiques des roches réservoirs et de couverture vont compléter l'étude géomécanique de faisabilité d'injection et de stockage de CO₂ dans les Basses-Terres du Saint-Laurent.

6. Remerciements

La présente étude a été réalisée grâce au support du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Nos remerciements spéciaux vont à B. St-Pierre pour sa participation dans l'analyse initiale des élongations de puits. Nous sommes très reconnaissants à D.A. Castillo (Baker Hughes, Reservoir Development Services, Geomechanics, États-Unis) pour la collaboration très étroite et les consultations détaillées qui ont rendu possible l'évaluation de la magnitude du stress actuel. Nous remercions O. Heidbach (*World Stress Map*

Project, GFZ, Potsdam, Allemagne) pour les conseils concernant la technique de traitement des données d'élongations de puits et leur interprétation; Y. Duchaine pour son aide avec la compilation des données des diagraphies de caliper et de *dipmeter*; R. Thériault (MRNF) pour la carte numérique géologique et la carte du socle de la région utilisées dans cette étude. Seismic Micro-Technology a mis à notre disposition le programme d'interprétation sismique Kingdom Suite utilisé dans cette étude.

7. Références

- Adams, J., Sharp, J., and Stagg M.C., 1988. New focal mechanisms for Southeastern Canadian earthquakes. *Geol. Surv. Can., Open File 1892*, 111 p.
- Anderson EM. 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Bell, J.S., 1990. Investigating stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling records. In: Hurst, A., Lovell, M., and Morton, A., (eds.): *Geological applications of wireline logs*, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 48, 305-325.
- Bell, J.S., and Gough, D.I., 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 475-482.
- Brunner, F., Dean, L., Mireault, R., 2010. Estimate of reservoir pressure, formation permeability and wellbore "skin" for DST tests for 5 wells of Bécancour area, Saint-Lawrence Platform, Quebec. CD ROM.
- Castonguay, S., Dietrich, J., Shinduke, R. et Laliberté, J-Y., 2006. Nouveau regard sur l'architecture de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches du sud du Québec par le retraitement des profils de sismique réflexion M-2001, M-2002 et M-2003. *Geological Survey of Canada, Open file 5328*.
- Cawood, P.A., McCausland, P.J.A. et Dunning, G.R. 2001. Opening Iapetus: constraints from the Laurentian margin in Newfoundland. *Geological Society of America Bulletin*, 113 (4), 443–453
- Faure, S., Tremblay, A., and Angelier, J., 1996a. Alleghanian paleostress reconstruction in the Northern Appalachians: intraplate deformation between Laurentia and Gondwana. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108: 1467–1480.
- Faure, S., Tremblay, A., and Angelier, J., 1996b. State of intraplate and tectonism of northeastern America since Cretaceous time, with particular emphasis on the New England – Quebec igneous province. *Tectonophysics*, 255: 111–134.
- Faure, S., Tremblay, A., and Malo, M., 2004. Reconstruction of Taconian and Acadian paleostress regimes in the Quebec and northern New Brunswick Appalachians. *Can. J. Earth Sci.*, 41: 619–634.
- Faure, S., Tremblay, A., Malo, M., and Angelier, J. 2006. Paleostress Analysis of Atlantic Crustal Extension in the Quebec Appalachians. *The Journal of Geology*, 114: 435–448.
- Globensky, Y. 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Direction Générale de la Recherche Géologique et Minérale, MM 85-02
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. and Müller, B., 2008. The World Stress Map database release 2008 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008, and references therein.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfe, D., Müller, B., 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*, 482: 3–15.
- Hibbard, J.P., van Staal, C.R., et Rankin, D.W., 2007. A comparative analysis of pre-Silurian crustal building blocks of the northern and the southern Appalachian orogen. *American Journal of Science*, 307, 23–45.
- Konstantinovskaya, E.A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L.B., et Thériault, R., 2009. Effects of basement structure, sedimentation and erosion on thrust wedge geometry: an example from the Quebec Appalachians and analogue models: *Bulletin of Canadian petroleum geology*, 57 (1), 34–62.
- Konstantinovskaya, E. Claprood, M., Duchesne, M., Malo, M., Lefebvre, R., 2010a. Le potentiel de stockage de CO2 expérimental dans les aquifères salins profonds de Bécancour: Partie I, Analyse des diagraphies et des profils sismiques. Rapport INRSCO2-2010-VC2.1, 59 p. http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=fr/publications_fr
- Konstantinovskaya, E., Malo, M., St-Pierre B., and Matton, G., 2010b. Present-day stress analysis in the Saint-Lawrence lowlands from borehole breakouts and geological implications, APGQ/QOGA Meeting, Montreal, QC, Canada, Oct 2010.
- Konstantinovskaya E., Malo M., Castillo D.A., 2011 Present-day stress analysis in the Saint-Lawrence lowlands from borehole breakouts and implications for CO2 injection. Recovery 2011 Conference, Calgary, Canada, May 9-13, 2011
- Lamontagne, M., Keating, P., and Toutin, T., 2000, Complex faulting confounds earthquake research in the Charlevoix seismic zone, Québec: *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, 81 (26): 289, doi: 10.1029/00EO00213.
- Lamontagne, M., Keating, P., and Perreault, S., 2003. Seismotectonic characteristics of the Lower Saint-

- Lawrence seismic zone, Quebec: Insights from geology, magnetics, gravity, and seismics: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40: 317–336, doi: 10.1139/e02-104.
- Lavoie, D., 1994. Diachronous tectonic collapse of the Ordovician continental margin, Eastern Canada; comparison between the Quebec Re-entrant and Saint-Lawrence Promontory: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31, 1309–1319.
- Lemieux Y., Tremblay A. et Lavoie D. 2003. Structural analysis of supracrustal faults in Charlevoix area, Quebec: relation to impact cratering and the St-Laurent fault system. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 (2), 221–235.
- Mardia, K.V., 1972. Statistics of directional data: probability and mathematical statistics. - 357 pp., London (Academic Press).
- Mazzotti, S., and Townend, J., 2010. State of stress in central and eastern North American seismic zones. *Lithosphere*, 2 (2): 76-83, doi: 10.1130/L65.1.
- Plumb, R.A., Cox, J.W., 1987. Stress directions in eastern North America determined to 4.5 km from borehole elongation measurements. *Journal of Geophysical Research*, 92: 4805-4816.
- Plumb, R.A., Hickman, S.H., 1985. Stress-induced borehole enlargement: a comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well. *J. Geophys. Res.*, 90: 5513-5521.
- Rankin, D. 1976. Appalachian salients and recesses: Late Precambrian continental breakup and the opening of the Iapetus Ocean. *Journal Geophysical Research*, 81 (32), 5605–5619.
- Schmitt, D.R., 2010. Borehole Stress Measurement Methods: Experiences from Scientific Drilling. *GeoCanada 2010, Abstracts*, www.geocanada2010.ca
- Séjourné, S., Dietrich, J., et Malo M., 2003. Seismic characterization of the structural front of southern Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51 (1), 29–44.
- Sperner, B., Müller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J., and Fuchs, K., 2003. Tectonic Stress in the Earth's Crust: Advances in the World Stress Map Project. In: Nieuwland D. (ed.): *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 212, 101-116.
- St-Julien, P., et Hubert, C. 1975. Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, v. 274-A, p. 337–362.
- Thériault, R., Laliberté, J.-Y., Brisebois, D., et Rheault, M., 2005. Fingerprinting of the Ottawa-Bonnechère and Saguenay grabens under the Saint-Lawrence Lowlands and Québec Appalachians: prime targets for hydrocarbon exploration: *Geological Association of Canada, Abstracts*, Halifax, Nova Scotia, 65
- Thomas, W.A. 2006. Tectonic inheritance at a continental margin. *GSA Today*: 16 (2), 4–11.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L.G., and Anderson, R.N., 1985. Well bore breakouts and in situ stress. *J. Geophys. Res.*, 90, 5523-5530.
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut, D.J., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (7-8) : 1049-1076.

ANNEXES

Annexe 1. Directions du stress actuel maximal horizontal dans les Basses-Terres du Saint-Laurent à partir des élongations de puits, d'après Plumb et Cox (1987)

Site	Latitude	Longitude	SH Azimuth	Quality
CAN157	46,66	-71,57	60	B
CAN159	46,18	-72,63	46	A
CAN160	45,8	-72,43	43	C
CAN161	46,4	-71,66	47	B
CAN162	46,5	-71,57	62	B
CAN163	46,51	-71,6	66	C
CAN164	45,74	-72,77	35	A
CAN165	46,52	-71,58	62	B
CAN166	46,49	-71,61	53	C
CAN168	46,35	-71,7	51	A
CAN169	46,37	-72,41	53	B
CAN171	45,76	-72,8	30	B
CAN174	46	-72,34	52	B

Annexe 2. Directions du stress actuel maximal horizontal S_{Hmax} dans les Basses-Terres du Saint-Laurent à partir des élongations de puits obtenues dans cette étude

Well No	Name	Year	Location		Depth m	SL m	N of breakouts	Mean direction		Standard deviation	Quality Rating	Comment
			N	W				Sh	SH			
169	SOQUIP et al. St Flavien 1 (Cedre)	1974	46 29' 25"	71 36' 19"	430-1280	460	3	112.14	22.14	2.81	D	L
177	SOQUIP et al. St Flavien 2	1976	46 30' 38"	71 32' 48"	543-1707	170	9	171.41	81.41	18.61	B	L
180	SOQUIP et al. St Flavien 4	1977	46 29' 43"	71 34' 01"	365-2060	442	5	155.74	65.74	19.58	C	n
181	SOQUIP et al. St Helene 1	1977	45 44' 12"	72 46' 24"	905-3033	513	14	120.55	30.55	7.93	A	L
183	SOQUIP et al. St Flavien 6	1977	46 30' 57"	71 34' 47"	380-805	388	3	85.32	175.32	4.72	D	n
185	SOQUIP et al. Notre-Dame du Bon Conseil No 1	1978	46 00' 41"	72 20' 20"	1412-4010	1417	26	148.88	58.88	6.23	A	L
189	SOQUIP et al. St Tomas d'Aquin 1	1978	45 41' 54"	72 59' 06"	1095-1349	37.3	15	121.97	31.97	6.78	A-B	L
195	SOQUIP et al. St Louis Blandford 1	1980	46 16' 38"	72 02' 14"	533-746	73.2	10	146.97	56.97	32.12	B-C	L
196	SOQUIP Petrofina Becancour 1	1981	46 21' 60"	72 24' 42"	630-1089	25.1	2	153	63	20.92	D	n
202	SOQUIP Lemaire et al. Joly 3	1985	46 28' 50"	71 37' 40"	240-546	87	8	7.08	97.08	9.37	B-C	L
214	BVI et al. St Simon 1	1992	45 41' 33"	72 48' 42"	615-3214	925	18	133.04	43.04	4.07	A	L
215	SOQUIP et al. St Flavien 8	1992	46 30' 20"	71 34' 58"	1150-1664	216	9	167.53	77.53	8.97	B	L
221	SOQUIP et al. St Flavien 9	1993	46 31' 16"	71 35' 08"	1035-1673	202	9	163.68	73.68	13.6	B	L
222	BVI et al. St Wenceslas 1	1993	46 10' 55"	72 19' 12"	598-2459.5	266	17	156.76	66.76	12.78	A-B	n
225	SOQUIP et al. St Flavien 10	1994	46 30' 21"	71 34' 56"	1133-1317.5	50.5	8	137.76	47.76	9.83	B-C	n
227	SOQUIP et al. St Flavien 12	1995	46 30' 22"	71 34' 52"	390-470	55	3	102.93	12.93	11.07	D	L
228	SOQUIP et al. St Flavien 13	1996	46 30' 44"	71 34' 06"	895-1620	63	9	136.03	45.03	18.24	B-C	L

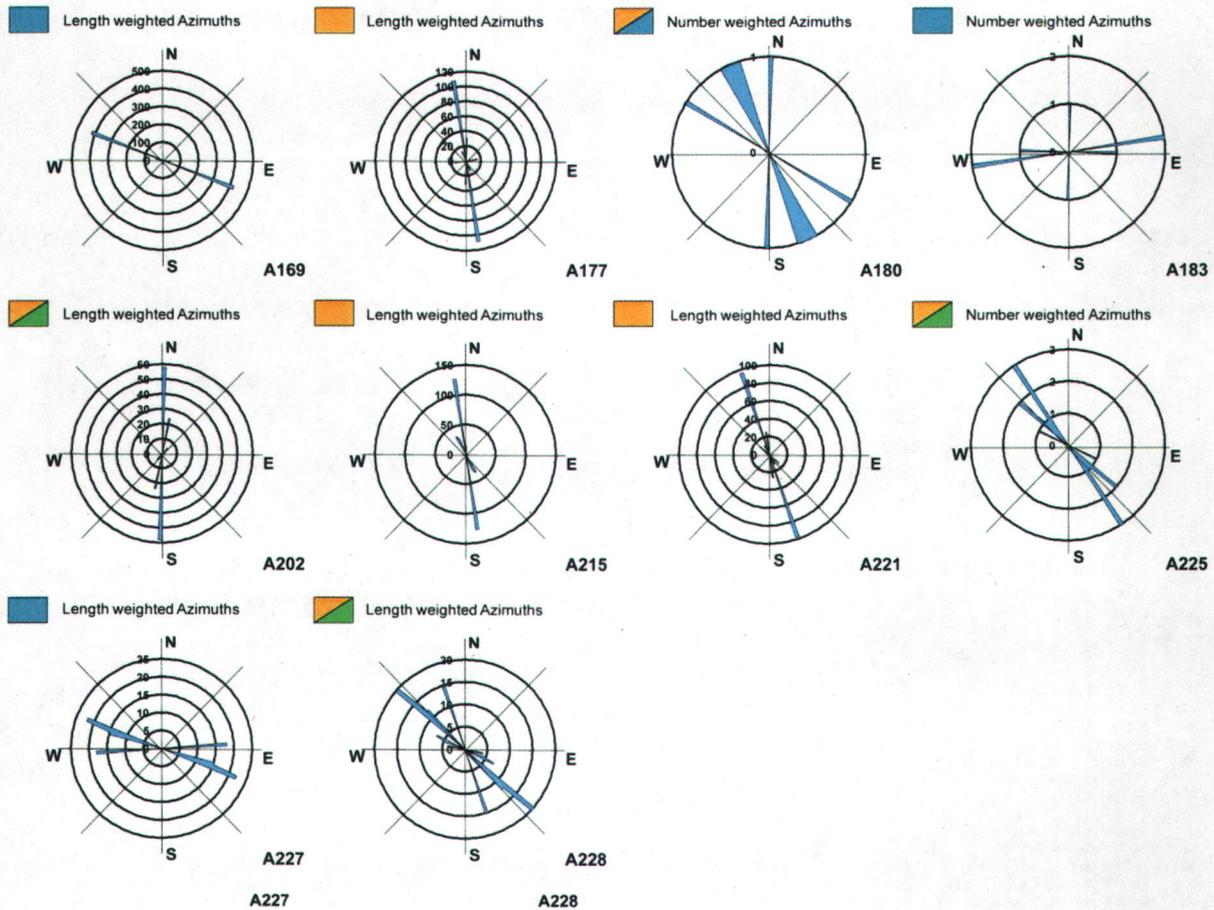
Note : L - statistique basée sur la longueur et n – sur les nombre des élongations de puits.

Les rosaces de directions d'élongations de puits (= stress actuel minimal horizontal S_{Hmin}) obtenues pour chaque puits à partir des élongations de puits dans la succession sédimentaire Paléozoïque de la plate-forme du Saint-Laurent et des écaïlles tectoniques des Appalaches de Québec sont présentées ci-dessous. Les données obtenues ont été qualifiées conformément aux critères utilisés par WSM Project (ci-joint). Seulement les données des classes A-C ont été utilisées pour la construction de rosaces sommaires de S_{Hmax} (Fig. 8).

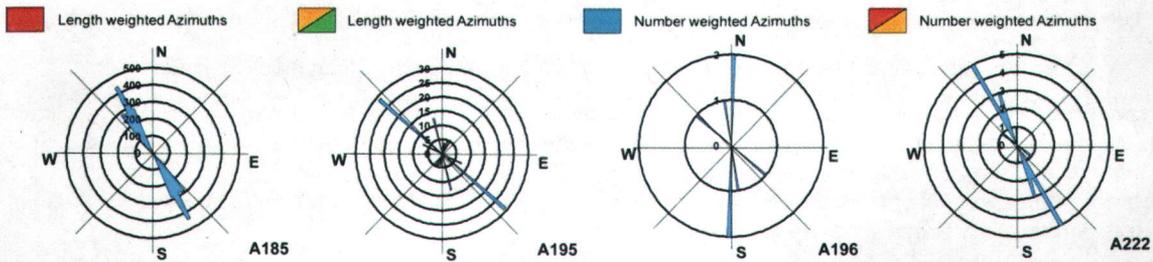
Table 2: World Stress Map quality ranking criteria for breakouts (s.d. = standard deviation) (Sperner et al., 2003).

A-Quality	B-Quality	C-Quality	D-Quality	E-Quality
Wells that have ten or more distinct breakout zones with a combined length > 300 m; and with s.d. ≤ 12°	Wells that have at least six distinct breakout zones with a combined length > 100 m; and with s.d. ≤ 20°	Wells that have at least four distinct breakouts zones with a combined length > 30 m; and with s.d. ≤ 25°	Wells that have less than four breakouts zones or a combined length < 30 m or with s.d. > 25°	Wells with no reliable breakouts detected or with extreme scatter of breakout orientations (s.d. > 40°)

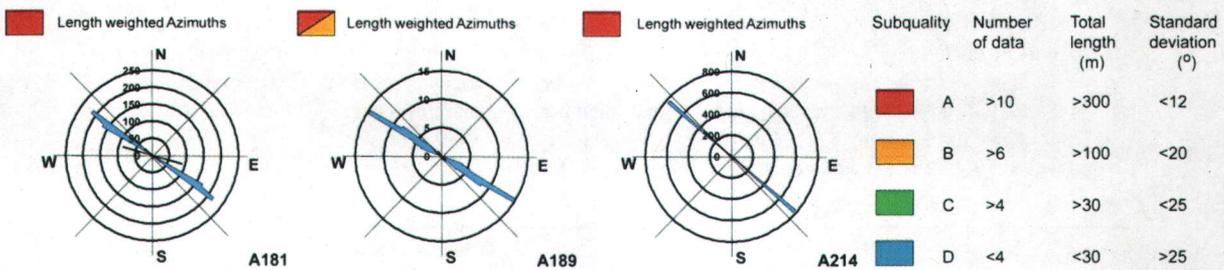
Saint-Flavien area



Bécancour-Notre Dame area



Saint-Simon area



Annexe 3. Les données de pression des fluides P_f dans les puits de la région de Bécancour.

<i>Puits No</i>	<i>Nom du puits</i>	<i>Pression de fluides P_f, kPaa</i>	<i>Profondeur, m</i>	<i>Gradient P_f, kPa/m</i>
A156	Husky, Gentilly No 1	28927,0	2343,9	12,3
		28446,0	2269,2	12,5
A158	Husky Bruyères No 1	17656,0	1130,8	15,6
		18187,0	1180,5	15,4
A196	SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 1	16261,0	1336,0	12,2
		14937,0	1131,0	13,2
		12410,0	1029,0	12,1
		9334,0	971,0	9,6
		8805,0	796,0	11,1
A198	SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 2	13736,0	1101,0	12,5
		14295,0	1170,0	12,2
		11730,0	939,0	12,5
		10720,0	866,0	12,4
		13077,0	1161,0	11,3
A250	Junex, Bécancour No 8	10456,0	904,1	11,6
		7564,0	816,8	9,3

Les données présentées sont d'après Brunner et al. (2010)

Annexe 4. Gradient du stress vertical S_v dans les puits des Basses-Terres du Saint-Laurent.

<i>Puits</i>	<i>Nom du puits</i>	<i>Gradient S_v, kPa/m</i>
A181	SOQUIP et al., Sainte-Hélène No 1	26,59
A185	SOQUIP Dome et al., Notre-Dame-du-Bon-Conseil No 1	26,48
A196	SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 1	25,73
A198	SOQUIP Pétrofina, Bécancour No 2	25,34
A202	SOQUIP Lemaire et al Joly No 3	26,16
A214	BVI et al., Saint-Simon No 1	24,77
A215	SOQUIP et al., Saint-Flavien No 8	26,13
A221	SOQUIP et al., Saint-Flavien No 9	26,37
A222	BVI et al., Saint-Wenceslas No 1	26,41
A225	SOQUIP et al., Saint-Flavien No 10	26,08
A227	SOQUIP et al., Saint-Flavien No 12	26,45
A228	SOQUIP et al., Saint-Flavien No 13	26,07
A250	Junex, Bécancour No 8	25,54

Annexe 5. La magnitude du stress minimal horizontal S_{hmin} à partir des leak-off tests dans les puits des Basses-Terres du Saint-Laurent.

<i>Puits</i>	<i>Profondeur, m</i>	<i>SAP, kPa</i>	<i>HP, kPa</i>	<i>S_{hmin} kPa</i>
A196	908,41	7136	9621	16757
A214	3257	35000	34840	69840
A222	587	9000	6797	15797
A222	2500	35000	30416	65416
A225	1526	15500	18943	34443

Note : SAP – pression appliquée en surface lors de leak-off test, HP –pression hydrostatique de boue : $HP = MW * g * z$, où MW - poids de boue (kg/m^3), g – accélération gravitaire (m/s^2), z – profondeur TVD (m). Voir Annexe 2 pour le nom des puits.