



**Conseil économique
et social**

Distr.
GÉNÉRALE

ENERGY/WP.3/GE.5/2005/7
29 octobre 2004

FRANÇAIS
Original: ANGLAIS/RUSSE

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

COMITÉ DE L'ÉNERGIE DURABLE

Groupe de travail du gaz

Groupe spécial d'experts de la fourniture
et de l'utilisation du gaz

Sixième session, 20 janvier 2005

(point 7 de l'ordre du jour provisoire)

**PRINCIPALES QUESTIONS GÉOCHIMIQUES SOULEVÉES PAR
LA PRODUCTION DE GAZ ET LE STOCKAGE SOUTERRAIN
DE PÉTROLE ET DE GAZ**

Préparé par la délégation de la Fédération de Russie

Note du secrétariat: Le présent document a été établi en application de la décision adoptée par le Groupe spécial d'experts à sa cinquième session (ENERGY/WP.3/GE.5/2004/2, par. 8 e)), qui s'est tenue à Genève en janvier 2004, et sera examiné par le Groupe spécial d'experts de la fourniture et de l'utilisation du gaz à sa sixième session.

Les intéressés sont invités à prendre connaissance du présent document et à envoyer leurs observations à M. V. SMIRNOV, Directeur général de PODZEMGAZPROM, 1, Pl. Kourtchatova, 123182 Moscou (Fédération de Russie). Téléphone: +7 095 196 7524, télécopie: + 7 095 196 1704 et courrier électronique: smirnov-vi@mail.ru.

1. L'exploitation des gisements de gaz, de condensat de gaz et de pétrole, ainsi que la construction et l'exploitation de réservoirs souterrains de gaz et de pétrole, s'accompagnent, comme toute activité géologique, d'une modification des contraintes internes et d'une déformation et de déplacements des roches de couverture et des roches profondes, c'est-à-dire de phénomènes géomécaniques. Ces phénomènes géomécaniques sont à l'origine de contraintes supplémentaires lors de la construction des puits, de l'apparition, dans le massif géologique, de zones excessivement fissurées et perméables (c'est-à-dire de nouvelles voies d'écoulement des fluides), et de glissements de terrain en surface. La nature et l'intensité des phénomènes géomécaniques déterminent en grande partie le niveau de sécurité environnementale et industrielle des sites d'extraction, du stockage souterrain et du transport des hydrocarbures bruts et de transformation.

2. Avant d'en venir aux principales difficultés géomécaniques rencontrées lors de l'extraction du gaz, du condensat de gaz et du pétrole, ainsi que lors du stockage souterrain des hydrocarbures gazeux et liquides, il convient de s'arrêter sur les différences entre *géomécanique* et *géodynamique*, car depuis une dizaine d'années, on assiste à une confusion évidente, consciente ou inconsciente, de ces deux notions.

3. La *géodynamique* est la science qui étudie les processus intervenant dans les grandes profondeurs qui découlent de l'évolution de la planète et qui déterminent les mouvements de la matière et de l'énergie à l'intérieur de la Terre et dans l'écorce terrestre. Ces processus très profonds ne peuvent être étudiés par observation directe, et leur nature ne peut être évaluée que sur la base de leurs manifestations dans les structures superficielles de l'écorce terrestre, par l'élaboration de diverses constructions théoriques, conceptions et hypothèses qui concernent la planète entière (par exemple, sur la base de l'hypothèse de l'immobilité des continents ou de l'hypothèse qui lui est contraire, celle de la dérive des continents, qui donnent lieu à des interprétations différentes des processus intervenant dans les grandes profondeurs). Lorsqu'on parle de géodynamique en relation avec l'extraction de ressources minérales, on pense généralement à un aspect particulier de la géodynamique, à savoir la géodynamique régionale, qui étudie les interactions des couches lithosphériques et leurs manifestations sur une portion bien délimitée de la surface du globe. Pourtant, même dans ce cadre relativement restreint, l'interprétation des phénomènes géodynamiques et, surtout, les prévisions en la matière, ne peuvent être réalisées sans l'aide des théories et hypothèses à l'échelle du globe.

4. À la différence de la géodynamique, la *géomécanique* s'intéresse aux phénomènes de déformation et d'altération des roches et des masses rocheuses résultant des activités industrielles d'extraction de ressources minérales profondes, ainsi que de la construction et de l'exploitation des divers types d'équipements souterrains. La géomécanique s'intéresse tout particulièrement au terrain rocheux qui se trouve au contact direct des équipements souterrains ou qui est sujet à des déplacements du fait de l'extraction d'une ressource minérale ou de l'exploitation d'équipements souterrains. Ainsi, la superficie de terrain rocheux étudié par la géomécanique ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres carrés, alors que la géodynamique régionale porte sur l'étude de l'écorce terrestre de régions entières dont la superficie atteint plusieurs milliers de kilomètres carrés. La géomécanique est étroitement liée à la géologie et au génie géologique, à la géophysique et aux autres sciences de la Terre. Lorsque cela est possible, la géomécanique se base sur les résultats d'études géodynamiques, par exemple sur les données relatives aux contraintes actuelles des masses rocheuses en divers points du globe. Inversement, la géodynamique utilise les résultats des études géomécaniques,

par exemple les données sur les contraintes du terrain rocheux obtenues dans le cadre d'expériences faites à l'aide de puits par fracturation hydraulique. De plus, la géomécanique est liée à des disciplines techniques telles que l'exploitation des gisements, la construction et l'exploitation des équipements souterrains et la mécanique de construction. La géomécanique s'intéressant également aux facteurs liés à la production, elle constitue une discipline plus large que la géodynamique, sauf pour ce qui est de la taille des territoires étudiés, qui est beaucoup plus restreinte. La géomécanique et la géodynamique sont donc deux disciplines voisines, mais dont les missions sont différentes.

5. Quelles sont les difficultés scientifiques et techniques que la géomécanique peut et doit s'attacher à résoudre, en rapport avec l'exploitation des gisements de gaz, de condensat et de pétrole et des réservoirs souterrains de gaz et de pétrole?

a) La première tâche (qui est aussi l'une des principales) que la géomécanique se doit d'accomplir tient à l'évaluation quantitative des propriétés mécaniques et des contraintes initiales d'un terrain rocheux, y compris de la couche-réservoir. C'est à partir des résultats de cette évaluation que seront résolus les problèmes ultérieurs liés non seulement aux processus géomécaniques, mais aussi à la dynamique des gaz et des fluides. Dans l'idéal, il faut disposer, avant même la mise en service du gisement ou du réservoir souterrain, d'une ventilation horizontale et verticale des indicateurs quantitatifs décrivant les propriétés et l'état de la roche dans les limites de la concession minière. La principale difficulté pour y parvenir tient à l'impossibilité d'obtenir une évaluation des contraintes initiales (c'est-à-dire avant toute intervention humaine) d'une roche: les propriétés mécaniques d'une roche sont aujourd'hui étudiées en laboratoire, à partir de matériaux prélevés par carottage. La seule méthode d'évaluation directe des contraintes initiales est la fracturation hydraulique à l'aide de puits. Autrement dit, dans un cas comme dans l'autre, il est indispensable de réaliser des forages, qui induisent nécessairement une modification de la répartition des contraintes initiales de la roche et l'apparition de phénomènes de déformation et d'altération susceptibles de modifier l'état et les propriétés des carottes et de la roche située à proximité des forages. Pour que de telles évaluations soient fiables, il faut donc à la fois élaborer de nouvelles méthodes d'évaluation des propriétés et de l'état initial des roches et améliorer les méthodes actuelles d'interprétation des résultats obtenus en tenant compte des phénomènes géomécaniques qui se produisent lors du forage de puits de prospection.

b) L'autre champ d'activité de la géomécanique consiste à réaliser des prévisions et à assurer la stabilité des puits au sens le plus large du mot, c'est-à-dire à maintenir les propriétés requises pour l'exploitation des équipements souterrains pendant toute la durée d'exploitation prévue. Ce travail commence dès le stade du forage des puits qui, comme précédemment indiqué, engendre une modification de la répartition des contraintes internes en raison de phénomènes de déformation et d'altération des parois des puits et de la roche adjacente. En fonction des propriétés de la roche, de l'état du terrain et des propriétés de la solution utilisée pour le forage, les phénomènes de déformation et d'altération peuvent se traduire par l'apparition de cavités ou de fissures sur les parois des puits ou leur ovalisation et la désintégration de la roche, ou encore leur fissuration du fait de la fracturation hydraulique, ce qui exerce, notamment, un effet défavorable sur les indicateurs techniques et économiques du forage et sur la qualité de la cimentation du puits, allant même jusqu'à provoquer des accidents. Un des moyens de s'assurer du bon état des parois des puits et de la roche adjacente consiste à donner à la solution utilisée la densité appropriée. Une simple augmentation de

la densité de la solution argileuse ne résout pas le problème car, outre l'aspect économique (un gramme de densité supplémentaire n'est pas bon marché), certaines considérations techniques (bonne circulation de la solution, rentabilité des forages, risque de perte d'une partie de la solution argileuse dans les fissures créées par la fracturation hydraulique en cas de densité trop élevée, etc.) imposent l'utilisation de solutions de densité aussi faible que possible. Pour choisir la densité optimale de la solution compte tenu de la profondeur considérée (c'est-à-dire la densité minimale qui permette de garantir la stabilité du conduit du puits), il faut procéder à des estimations prospectives des possibilités et de la nature des altérations des parois du puits et des roches profondes, qui sont susceptibles de se produire à la suite de phénomènes géomécaniques.

6. La stabilité du tronçon renforcée du puits (notamment son étanchéité) lors de l'exploitation du gisement ou du stockage souterrain est déterminée par la qualité de la cimentation de l'espace entre les colonnes et les propriétés de la pierre de ciment, par les caractéristiques du cuvelage, par la nature et l'intensité des contraintes exercées sur le garnissage du puits, constitué d'un tubage et d'un anneau de ciment. La qualité de la cimentation, qui dépend largement de la stabilité de l'ouverture du trou de sonde, peut être améliorée en recourant à des techniques spéciales de tamponnement (par exemple cimentation combinée à plusieurs étapes, vibrage) et par un choix adapté de matériaux de tamponnement et de réactifs permettant le temps de prise et d'épaississement nécessaire, ainsi que par le choix d'une solution de tamponnement présentant les caractéristiques rhéologiques adéquates. Le choix de la structure du tubage (dimensions types, section et longueur des tubes, types de raccords vissés) et de la composition de la solution de tamponnement en fonction de la solidité mécanique et des propriétés adhésives du ciment utilisé s'opère en tenant compte de la nature et de l'intensité des contraintes subies par le garnissage du puits du fait de la pression intérieure, des contraintes ordinaires et extérieures indirectes, et des contraintes verticales liées à son propre poids. L'ampleur des contraintes extérieures horizontales (c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe du puits) et verticales peut être déterminée à partir de l'observation géomécanique des phénomènes de déplacement, de déformation et d'altération du terrain induits par le régime d'exploitation du gisement ou du réservoir souterrain. Cette observation géomécanique, orientée vers la prospective et la stabilisation des puits, est sérieusement compliquée lorsque l'axe du puits dévie de la verticale et en cas de pression de vapeur et de températures anormalement élevés.

7. L'étape suivante du travail scientifique et technique consiste à étudier le comportement mécanique des couches-réservoirs lorsqu'on y prélève ou qu'on y injecte des fluides. La couche-réservoir est le milieu poreux, consolidé ou non, qui, suite au prélèvement ou à l'injection d'un fluide, subit des contraintes dues à des variations importantes de la pression de vapeur interne. Ces contraintes entraînent une modification de l'état et une déformation de la structure de la couche ainsi que des déformations globales de la couche-réservoir, qui, à leur tour, provoquent des glissements des roches de couverture et des déformations de la surface de la Terre. Les contraintes et les déformations subies par la couche-réservoir s'accompagnent également d'une modification de ses propriétés d'étanchéité (porosité, perméabilité, etc.), tant horizontalement que verticalement. Ainsi, les paramètres techniques de l'exploitation du gisement ou du réservoir souterrain de gaz dans la couche-réservoir (pression, volumes de prélèvement et d'injection, débit du puits, etc.) sont directement liés aux phénomènes géomécaniques de déformation de la couche-réservoir, susceptibles d'apparaître en régime normal et en surrégime en fonction des contraintes subies par la structure de la couche.

C'est pourquoi l'analyse de l'évolution de ces phénomènes géomécaniques est indispensable non seulement pour prévoir les mouvements des roches de couverture et les déformations du sol en surface, mais aussi pour déterminer les paramètres techniques d'exploitation du gisement ou du réservoir souterrain.

8. Entre également dans cette catégorie de tâches l'augmentation du débit du puits résultant de l'intensification de la circulation de fluide. Un des moyens d'intensifier le flux dans le chantier consiste à pratiquer la fracturation hydraulique – simple, multiple, orientée, etc. – de la couche. Le même problème se pose lors de l'extraction du méthane de charbon, car la fracturation hydraulique de la couche destinée à réaliser des fissures de longueur et d'orientation données constitue le principal moyen de libérer le méthane pris dans la couche.

9. L'exploitation d'un gisement ou d'un réservoir souterrain s'accompagnent, à des degrés divers, de phénomènes de glissement et de déformation des roches de couverture (supérieures) et de la surface de la Terre. Les couches supérieures peuvent subir des phénomènes géomécaniques de déformation et de glissement sous différentes formes:

- Si la couche-réservoir est constituée de roches dures et solides – grès durs, calcaires ou dolomites –, les déformations seront faibles et élastiques et n'entraîneront que de faibles variations de la puissance de la couche (comprises entre quelques centimètres et plusieurs décimètres), qui, compte tenu de l'étendue du terrain concerné par ce mouvement, n'entraîneront pas de fléchissement ou de déformation significatifs des couches supérieures et de la surface du sol, même si, dans ce cas également, les conditions nécessaires à une migration du fluide vers les couches supérieures peuvent être réunies, un phénomène qui, selon toute vraisemblance, peut être observé en ce qui concerne le réservoir souterrain de gaz de Severo-Stavropol;
- Si la couche-réservoir est constituée de roches friables – sables, grès friables ou aleurites pures et denses – les déformations de la couche-réservoir seront importantes, et les variations de puissance pourront atteindre plusieurs mètres; dans ce cas, les fléchissements et déformations des couches supérieures seront substantiels, particulièrement sur les lisières du gisement, et pourront s'accompagner de glissements horizontaux d'une couche sur l'autre, ce qui présente des risques importants pour les puits en exploitation, et de l'apparition de zones de grande perméabilité et de fissures dans la zone de fracturation; les déformations en surface peuvent présenter des risques pour les bâtiments, ouvrages, équipements industriels et lieux de protection de l'environnement situés sur la zone;
- Si la couche-réservoir est constituée de roches dures et solides et si les couches de couverture contiennent des roches «sous-compactées» qui, à l'origine, se trouvaient sous une pression de fluides élevée (par exemple des argiles inondés faiblement perméables), même lorsque les déformations de la couche-réservoir restent faibles, les glissements du terrain rocheux exploité et les déformations de surface peuvent être importants, du fait de la migration de fluide de la roche sous-compactée vers le gisement épuisé et de l'affaissement du terrain, ce dernier phénomène pouvant atteindre parfois plusieurs mètres et s'accompagner d'un affaissement de même ampleur à la surface; ce processus de glissement et de déformation de surface a été

observé sur certains gisements de pétrole aux États-Unis et sur un des gisements de la mer du Nord;

- Si les couches supérieures présentent des dislocations dues à des failles, les glissements et les déformations peuvent prendre un caractère dynamique et se manifester sous la forme de secousses sismiques d'origine industrielle engendrées par le captage et l'injection de fluides qui stimulent la formation et le développement des failles et le chevauchement des plaques ainsi constituées; des phénomènes sismiques d'origine industrielle et de niveaux de magnitude divers ont été observés à plusieurs reprises près de gisements pétroliers (Gus Creek, Wilmington, Buena Vista Hills, aux États-Unis; Staro-Groznenskoe, en Russie) et de gaz (Lacq, en France; Caviaga, en Italie; Gazli, en Ouzbékistan); il existe une forte probabilité que des séismes d'origine industrielle se produiront du fait de l'exploitation du gisement de condensat de gaz d'Astrakhan, compte tenu de la structure géologique du terrain qui abrite le gisement et de la possible existence de failles.

10. Au vu de ce qui précède, on comprend à quel point il est important d'analyser et prévoir la possible apparition de phénomènes géomécaniques de glissement et de déformation des roches et de la surface du sol lors de l'exploitation des gisements et des réservoirs souterrains, que ce soit pour assurer un niveau suffisant de sécurité industrielle et environnementale ou pour réduire les coûts financiers engendrés par les travaux de réparation et de remise en état destinés à éliminer les répercussions des phénomènes géomécaniques sur les équipements industriels et leur exploitation.

11. Conformément aux prescriptions établies dans la législation russe et dans les directives des organes de surveillance des industries extractives en matière de protection des sous-sols et de sécurité industrielle des sites d'extraction des hydrocarbures, l'exploitation des gisements doit s'accompagner de la mise en place de systèmes d'observation topographique et géodésique des déformations de la surface de la Terre, ou de systèmes appelés «polygones géodésiques». Compte tenu de l'étendue des territoires des gisements, du coût des stations de surveillance et de l'inégalité importante entre les déformations de la surface du sol à l'intérieur de la cuvette de glissement, la conception et l'organisation des systèmes d'observation ne doivent s'effectuer que sur la base des résultats de l'analyse et des prévisions relatives à l'évolution des phénomènes géomécaniques. En outre, l'interprétation des résultats de l'observation, sans laquelle l'organisation d'un système d'observation perd tout son sens, n'est possible que sur la base des calculs géomécaniques correspondants. Il convient de noter que l'autorisation de bâtir sur le territoire d'un gisement ou d'un réservoir souterrain, y compris l'autorisation de construire des canalisations, des stations de compression et autres, n'est délivrée que sur présentation des justificatifs géologiques, notamment des résultats de l'analyse et des prévisions relatives aux phénomènes de glissement et de déformation de la surface du sol.

12. Une autre catégorie de problèmes d'ordre géomécanique est liée à l'aménagement, à l'exploitation, à l'entretien et à la mise hors service des réservoirs souterrains d'hydrocarbures gazeux ou liquides dans du sel gemme. En premier lieu, il s'agit d'assurer la stabilité et l'étanchéité des volumes de stockage pendant toute la durée d'exploitation, ce qui revient à déterminer les formes géométriques et les dimensions des volumes de stockage capables d'offrir une stabilité à long terme dans les différentes conditions géologiques et à définir les paramètres

techniques d'exploitation (contre-pression maximale et minimale du produit stocké, régimes de captage et d'injection). En dépit des réalisations remarquables des scientifiques soviétiques, russes et étrangers en ce qui concerne différents aspects de cette question, on ne peut pas dire que le problème soit aujourd'hui entièrement résolu.

13. Lors de la construction et de l'exploitation de réservoirs souterrains dans du sel gemme, il se pose également le problème de la stabilité et de l'étanchéité des puits de réservoir en exploitation, ainsi que le problème de l'analyse et de la prévision des phénomènes de glissement et de déformation de la couche supérieure et de la surface du sol. Dans ce cas précis, toutefois, ces problèmes comportent leurs spécificités, qui sont liées avant tout aux propriétés rhéologiques du sel gemme et aux techniques particulières utilisées pour l'aménagement et l'exploitation de réservoirs en cavités salines.

14. Des problèmes géomécaniques spécifiques se posent lors de la conservation et de la mise hors service des réservoirs souterrains en cavités salines par un procédé utilisant l'énergie nucléaire. Ce caractère spécifique tient avant tout à la façon dont sont équipés les réservoirs et plus particulièrement à l'effet dynamique qu'exercent sur les parois de la cavité les pressions et les températures très élevées qui ne peuvent être reproduites en laboratoire, mais qui modifient totalement les propriétés et l'état de la roche située au pourtour de la cavité. Ainsi, l'analyse des phénomènes géomécaniques de déformation et d'altération des couches profondes, dont l'objectif ultime est de prévoir l'apparition potentielle de canaux de migration des radionucléides depuis les cavités vers la roche et l'aquifère, n'est possible qu'après le règlement des problèmes d'inversion des processus géomécaniques, lorsque les propriétés initiales et l'état du terrain sont à nouveau constatés par observation naturelle à la suite des manifestations des processus géomécaniques (par exemple, pression à l'entrée du puits, résidus des cavités de stockage).

15. À l'heure actuelle, la conception des réservoirs souterrains de gaz et de pétrole en cavité saline est réalisée grâce à l'utilisation de réservoirs souterrains construits à partir de l'analyse géomécanique et des principaux paramètres techniques d'exploitation de ces équipements. L'analyse géomécanique est réalisée sur la base de l'étude détaillée des propriétés mécaniques et rhéologiques du sel gemme qui se trouve sur le lieu d'aménagement du réservoir. À cet effet, un laboratoire équipé d'un matériel d'expérimentation moderne a été créé.

16. À la différence de ce qui se fait pour le stockage souterrain du gaz et du pétrole en cavité saline, l'analyse géomécanique précédant la conception et la mise en place des solutions techniques lors de l'exploitation des gisements et du stockage de gaz en milieux poreux est pratiquement inutilisée en Russie, si on excepte les systèmes mis en place sur certains gisements et réservoirs pour l'observation topographique et géodésique des déformations de la surface du sol, encore que rien ne soit fait ou presque pour interpréter les résultats de ces observations. Cette situation s'explique par une connaissance manifestement insuffisante des phénomènes géomécaniques qui accompagnent l'exploitation des gisements et des réservoirs souterrains de gaz en milieu poreux et, du même coup, par l'absence d'une méthode de contrôle et de prévision de ces phénomènes, qui est pourtant indispensable à cette analyse, et dont l'élaboration peut être considérée comme faisant partie des défis techniques et scientifiques les plus actuels en la matière.

17. Pour résoudre efficacement ces problèmes, il faut, à notre avis, mettre sur pied des systèmes de *surveillance géomécanique* des gisements et réservoirs souterrains en cours

d'installation et d'exploitation. Les principaux objectifs de tels systèmes sont les suivants: évaluation des propriétés et de l'état des couches profondes et des couches supérieures et de l'évolution de ces propriétés dans le temps et l'espace; élaboration de modèles géomécaniques des gisements et réservoirs exploités; affinage des modèles géomécaniques sur la base de l'observation globale des manifestations des processus géomécaniques, y compris l'observation topographique et géodésique des déformations de la surface du sol, et confrontation des données d'observation et des résultats des évaluations prospectives de la nature et de l'intensité effectives de ces processus; réalisation de prévisions quant à l'évolution des phénomènes de glissement, de déformation et d'altération des couches profondes et des couches supérieures en tenant compte des paramètres techniques théoriques et effectifs d'exploitation des gisements et des réservoirs souterrains; évaluation de l'action des phénomènes géomécaniques sur les équipements souterrains et de surface, élaboration des mesures de protection de ces équipements et mesures de protection de la sécurité environnementale et industrielle.

18. Outre la mise en place de systèmes de *surveillance géomécanique*, il semble judicieux de constituer une banque de données à l'échelle de toute la Russie pour répertorier les manifestations de processus géomécaniques lors de l'exploitation des gisements et des réservoirs souterrains, la nature et l'intensité de ces manifestations et l'ampleur de leurs effets sur les équipements et ouvrages souterrains et de surface, notamment les résultats des mesures topographiques des déformations de la surface du sol, les accidents dans les puits en exploitation, les variations anormales de la pression en couche en fonction des paramètres techniques d'exploitation des gisements et des réservoirs, etc. La création d'une telle banque de données permettra de décrire des conditions géomécaniques types d'exploitation des gisements de gaz et de condensat et des réservoirs souterrains de stockage, ce qui facilitera considérablement le travail méthodologique d'analyse, de prévision et de contrôle de ces phénomènes.
