

RÉSUMÉ

Titre : Le Greenland Analogue Project : Rapport final

Rapport n° : NWMO-TR-2016-12

Auteurs : Claesson Liljedahl L¹, Kontula A², Harper J³, Näslund J-O¹, Selroos J-O¹, Pitkänen P², Puigdomenech I¹, Hobbs M⁴, Follin S⁵, Hirschorn S⁴, Jansson P⁶, Kennell L⁴, Marcos N⁷, Ruskeeniemi T⁸, Tullborg E-L⁹, Vidstrand P¹

Société : ¹Svensk Kärnbränslehantering AB, ²Posiva Oy, ³Université du Montana, ⁴Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN), ⁵Golder associates, ⁶Département de géographie physique, Université de Stockholm, ⁷Saanio & Riekkola Oy, ⁸Commission géologique de Finlande, ⁹Terralogica AB

Date : Septembre 2016

Résumé

Ce rapport résume les principales constatations du Greenland Analogue Project (GAP), un projet de recherche en collaboration mené de 2008 à 2013 par les organisations nationales de gestion des déchets nucléaires de la Suède (SKB), de la Finlande (Posiva) et du Canada (SGDN). Le principal objectif du GAP était d'approfondir la compréhension scientifique des processus glaciaires et de leur influence sur les environnements de surface et souterrains pertinents au regard du comportement des dépôts géologiques en profondeur de combustible nucléaire irradié établis en milieu de roche cristalline. La nappe glaciaire du Groenland (NGGr) a été choisie par les chercheurs du GAP, en raison de sa taille, de son accessibilité et de son substratum rocheux cristallin, comme analogue naturel des processus glaciaires qui devraient se manifester de nouveau en Fennoscandie et au Canada pendant la durée de vie utile d'un dépôt géologique en profondeur (DGP).

Le secteur étudié dans le cadre du GAP est situé à l'est du village de Kangerlussuaq, sur la côte ouest du Groenland, et s'étend sur une superficie approximative de 12 000 km², dont approximativement 70 % est occupé par le NGGr. Destinées à mieux comprendre les processus hydrogéologiques, les activités du GAP comprenaient des travaux approfondis sur le terrain et des études de modélisation du NGGr liés à trois grands axes de recherche : 1) l'étude de la nappe glaciaire en surface; 2) le forage et l'étude directe des conditions à la base de la nappe glaciaire; et 3) l'étude de la géosphère. Les principaux objectifs et les principales activités associés à ces axes de recherche sont présentés ci-dessous :

1. L'étude de la nappe glaciaire en surface avait pour but de mieux connaître l'hydrologie de la nappe glaciaire et sa relation avec l'hydrologie subglaciaire et la dynamique des eaux souterraines. Ces travaux étaient principalement fondés sur des observations indirectes réalisées de la surface de la nappe glaciaire du réseau hydrologique jusqu'à la base de la nappe, pour recueillir des informations sur les parties de la nappe alimentant les infiltrations d'eau souterraines. Les activités liées à cet axe de recherche comprenaient la quantification de la production d'eau en surface de la nappe glaciaire ainsi que l'évaluation des voies d'écoulement de la surface de la nappe glaciaire jusqu'à l'interface entre la glace et le substratum rocheux sous-jacent.

2. Les travaux de forage et l'étude directe des conditions à la base de la nappe glaciaire visaient également à mieux comprendre l'hydrologie de la nappe glaciaire et les processus de formation des eaux souterraines à partir d'observations *directes* du réseau hydrologique de fond et de modélisations numériques de la nappe glaciaire; 2) la génération d'eau de fonte à l'interface entre la glace et le substratum rocheux; et 3) les conditions hydrologiques à la base de la nappe glaciaire. Les activités associées à cet axe de recherche comprenaient le forage dans la glace de plusieurs trous de sonde à trois endroits sur la nappe glaciaire, à des distances pouvant atteindre trente kilomètres du front glaciaire, pour évaluer le drainage, l'écoulement de l'eau, les conditions de fond et les pressions hydrologiques à l'interface entre la glace et le substratum rocheux.
3. L'étude de la géosphère était axée sur la dynamique d'écoulement des eaux souterraines et la composition chimique et isotopique de l'eau à des profondeurs de 500 mètres ou plus sous la surface du sol, y compris les données sur la profondeur du pergélisol, les conditions d'oxydoréduction et l'infiltration d'eaux de fonte glaciaire dans le substratum rocheux. Des trous de sonde profonds et inclinés ont été forés à travers le pergélisol à proximité des sites de surveillance hydrogéochimique de la nappe glaciaire. La nature des conditions du sol en dessous d'un lac proglaciaire a également été étudiée pour déterminer si des secteurs de sol non gelé à l'intérieur de la zone de pergélisol (taliks) peuvent servir de voie de communication entre les eaux souterraines profondes et les eaux de surface.

Les principales constatations tirées de ces trois axes de recherche ont permis de mieux comprendre les processus associés au NGGr. Plusieurs éléments importants sont résumés ci-dessous au regard des attributs pertinents pour l'évaluation de la sûreté à long terme d'un DGP.

Les processus transitoires de fonte des eaux à la surface de la nappe glaciaire : La fonte de la glace et l'écoulement des eaux en surface est un phénomène estival limité à une période de 3 à 4 mois (de mai à septembre), au cours de laquelle la surface glaciaire peut s'abaisser de 3 à 4 mètres. Le volume d'eau de fonte généré en surface chaque été excède la quantité prévue de fonte à la base de la nappe glaciaire de deux ordres de grandeur (cm de fonte à la base du glacier / mètres de fonte en surface). La période estivale de fonte domine complètement par conséquent le cycle annuel du volume d'eau disponible.

Le drainage abrupt des lacs supraglaciaires (LSG) dans des fractures fraîches est un des principaux mécanismes d'établissement des voies d'écoulement de la surface à la base du glacier. Presque toute l'eau de fonte de surface s'introduit dans la glace et atteint la base du glacier. Tout juste au-dessus de la *ligne d'équilibrage du glacier* (LEG), où les eaux de fonte commencent à s'accumuler, se trouve approximativement la limite intérieure où des quantités substantielles d'eau de fonte de surface sont susceptibles de s'écouler vers la base du glacier. Les variations saisonnières de l'écoulement de l'eau via le réseau de drainage de fond sous la zone d'ablation sont principalement liées à la fonte de la nappe glaciaire en surface.

La répartition thermique et la génération d'eau à la base de la nappe glaciaire : Des observations directes réalisées à partir de 23 trous de sonde forés jusqu'à la base de la nappe glaciaire à des distances de 200 m à 30 km du front glaciaire fournissent les premières preuves que l'ensemble du flanc externe du secteur étudié reposerait sur une base fondue (présence d'eau liquide) plutôt que sur une base universellement ou localement gelée. Aucune preuve n'indique qu'une configuration complexe de conditions de gel et de fonte existerait aux limites de la glace à l'intérieur du secteur étudié.

Selon les résultats des travaux de modélisation, l'emplacement de la limite entre les conditions de fonte et les conditions intérieures de gel serait très sensible aux valeurs de flux de chaleur géothermique, mais relativement peu sensible à la traction longitudinale causée par le glissement rapide de la glace près du front glaciaire. Pour tous les choix de conditions aux limites et de paramètres de modélisation considérés comme raisonnables, le secteur central gelé s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres autour de la ligne centrale de partage glaciaire du Groenland, mais plus de 75 % du secteur étudié de la NGGr est assujéti à des conditions de fonte à la base du glacier.

Les conditions hydrauliques aux limites pour les simulations d'eaux souterraines : Les conditions hydrologiques à la base de la nappe glaciaire varient dans le sens de la largeur du secteur étudié. Entre la ligne de partage glaciaire et le front glaciaire, les preuves indiquent qu'il y aurait trois différentes zones de fond, selon la quantité et la configuration des eaux de fonte : la *zone de lit gelé*, la *zone de lit mouillé* et la *zone de drainage sous-glaciaire des eaux de surface*. Cette dernière zone se subdivise en une zone à *drainage réparti* et une zone à *drainage transitoire par canaux*. Ces zones hydrologiques sont le résultat de processus de flux glaciaire de surface, de fond et internes et sont possiblement représentatifs des nappes glaciaires de l'hémisphère nord à un stade de développement semblable au stade actuel de la NGGr.

La conception révisée du réseau de drainage attribuable au projet GAP implique qu'une grande partie du lit à l'intérieur de la marge est couverte d'eau, plutôt que généralement drainée par des canaux séparés par des zones peu mouillées. De plus, le réseau de drainage ne devrait pas être assujéti à des grandes chutes de pression en réponse à une introduction d'eau forcée, comme on le supposerait pour un réseau à canaux qui draine rapidement de grandes quantités d'eau du lit. Ensemble, les mesures hydrauliques et les analyses des trous de sonde forés dans la glace indiquent que la pression hydraulique du couvert glaciaire (c.-à-d. la charge hydraulique correspondant à 92 % de l'épaisseur de la glace) fournit une description appropriée de la pression hydraulique sous-glaciaire sous forme de valeur moyenne pour l'ensemble de la nappe glaciaire pour une année.

Rôle du pergélisol et des taliks : Le secteur étudié dans le cadre du GAP est situé dans une région de pergélisol continu. À proximité du front glaciaire, l'épaisseur du pergélisol atteint 350 à 400 m, selon l'analyse des trous de sonde DHGAP03 et DH-GAP04. La plus grande partie de la base de la nappe glaciaire du secteur étudié, y compris les zones marginales, présenterait des conditions de fonte sous-glaciaire, à l'exception des parties centrales de la nappe glaciaire. Cela, en combinaison avec le fait que la plus grande partie

de la région actuellement glacée était également glacée pendant les 10 000 dernières années (et, par conséquent, n'a connu aucun développement du pergélisol subaérien pendant cette période), indique que le pergélisol n'existe pas sous la plus grande partie des grands secteurs à base chaude de la nappe glaciaire, à l'exception des limites de la nappe, où une marge de pergélisol s'étend probablement sous une partie de la glace. On ne sait pas sur quelle distance cette marge de pergélisol sous-glaciaire s'étend (par exemple, sur une longueur de quelques centaines de mètres ou sur plusieurs kilomètres).

Là où le pergélisol est d'une épaisseur supérieure à 300 m, un lac d'un diamètre d'approximativement 400 m serait nécessaire pour qu'il existe des zones non gelées à travers l'épaisseur totale du pergélisol, par exemple, à travers des taliks, qui fournissent une voie de communication possible entre les eaux souterraines profondes et les eaux de surface. Le trou de sonde DH-GAP01 a été foré sous un lac (le « lac Talik »), confirmant pour la première fois l'existence d'un talik traversant sous un lac dans une zone de pergélisol continu. De plus, l'analyse de cet échantillon de forage a fourni les premières informations sur les eaux souterraines contenues dans un talik situé à grande proximité du front glaciaire. Bien qu'une hypothèse a été émise selon laquelle le lac Talik agirait entièrement comme un élément d'évacuation, les données tirées de mesures de la charge hydraulique et la composition isotopique stable des eaux souterraines échantillonnées sont conformes à des conditions de recharge saisonnière présentes à cet endroit.

Caractéristiques des termes extrêmes des eaux de fonte : Les caractéristiques d'un terme extrême des eaux de fonte sont nécessaires pour évaluer la composition de l'eau des secteurs glacés ainsi que pour réaliser une modélisation numérique de l'écoulement des eaux souterraines et du transport d'un soluté réactif. D'après l'analyse de la composition des eaux de fonte réalisée dans le cadre du projet GAP et présenté dans la littérature scientifique, un terme extrême des eaux de fonte glaciaire aurait des signatures appauvries en $\delta^{18}\text{O}$ (-30 à 25‰) et $\delta^2\text{H}$ (-235 à -200‰) correspondant à des conditions de climats froids et une teneur en solides totaux dissous très faible, les concentrations de solutés variant de presque zéro à approximativement 1 mM pour les principaux solutés, tels que le Ca^{2+} .

Profondeur de la recharge glaciaire : Les signatures isotopiques stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$) indiquent que les eaux souterraines prélevées dans les deux trous de sonde (DH-GAP01, DH-GAP04) ont comme origine de l'eau de fonte glaciaire. Les millions d'années de conditions principalement glaciaires dans cette région, la géologie structurale et la répartition des fractures locales, la présence de gradients hydrauliques forts et la présence de fluides de salinité relativement faible en profondeur dans la masse rocheuse ont probablement contribué à la pénétration des eaux de fonte glaciaire à des profondeurs d'au moins 500 m à cet endroit.

Les concentrations relativement faibles en Na et Cl dans les eaux souterraines proviennent probablement de la matrice rocheuse (interactions eau-roche et diffusion), alors que le Ca et le SO_4 dans ces eaux proviennent de la dissolution du gypse, qui survient sous forme de remplissage minéral de fractures à des profondeurs supérieures à

300 m approximativement. Une interprétation préliminaire des concentrations d'He dissous indique la présence de conditions stables accompagnées d'un écoulement limité d'eaux souterraines à des profondeurs supérieures à 300 m à l'emplacement du trou de sonde DH-GAP04.

Stabilité redox du réseau d'eaux souterraines : Sous le pergélisol (ou à des profondeurs supérieures à 350 m), les conditions redox semblent prévaloir dans le secteur étudié. La pénétration par le passé d'oxygène dissous dans les eaux de fonte dans le substratum rocheux est survenu à une profondeur limitée, comme l'indique la présence de pyrite dans les fractures de plus de 50 m de profondeur; des oxyhydroxydes de fer n'ont été trouvés que dans les couches rocheuses supérieures (moins de 60 m de profondeur) et seulement quelques occurrences isolées de goethite ont été repérées jusqu'à une profondeur de 260 m.

Ces exemples illustrent les façons dont les recherches menées dans le cadre du projet GAP ont permis d'approfondir la compréhension scientifique des processus hydrogéologiques associés à la présence d'une nappe glaciaire, y compris la nature temporelle et spatiale des processus survenant à la surface de la nappe glaciaire, les conditions associées au lit de la nappe glaciaire (génération de chaleur et d'eaux de fonte) et les interactions entre les eaux de fonte glaciaire et les réseaux d'eaux souterraines sous-jacentes. Dans les évaluations des risques que posent les DGP de combustible nucléaire irradié pour les humains et pour l'environnement, les incertitudes liées à la compréhension des processus sont généralement traitées à l'aide d'hypothèses qui surestiment les conséquences radiologiques potentielles plutôt qu'elles ne les sous-estiment. La compréhension scientifique accrue des processus hydrologiques glaciaires acquise grâce au projet GAP et la réduction associée des incertitudes apporte une nouvelle perspective qui éclairera et renforcera les futurs dossiers de sûreté, y compris les évaluations de la sûreté réalisées pour les DGP en milieux de roche cristalline. De plus, les constatations tirées de ce projet pourraient permettre une réévaluation du degré de pessimisme lié à certaines hypothèses faites dans le cadre d'évaluations de sûreté et de travaux de modélisation effectués antérieurement.