

Mise en valeur du SECTEUR CANADIEN DE L'ÉNERGIE ET DES MINES grâce aux applications génomiques de pointe

Stratégie sectorielle sous la direction de Génome Alberta et de l'Institut de génomique de l'Ontario, en collaboration avec les centres de génomique des autres régions canadiennes et financée par Génome Canada
Juin 2013



La génomique* est la science qui vise à élucider et à comprendre toute l'information génétique d'un organisme (micro-organismes, plantes, animaux et humains) codée dans son ADN et les compléments correspondants que sont l'ARN, les protéines et les métabolites.

Les connaissances et les innovations issues de ce domaine résolvent des problèmes biologiques complexes, tout en soulevant des questions d'importance sociétale et économique.

La génomique a déjà généré des gains économiques et sociétaux immenses pour la population canadienne sous forme de meilleurs soins de santé, d'une meilleure qualité, innocuité et production des aliments et de protection de notre environnement et de nos ressources naturelles.

À l'avenir, la génomique deviendra le fondement de la bioéconomie (toute activité économique issue de la recherche en sciences de la vie) en croissance au Canada et qui, selon les estimations, représentera quelque 2,25 % du PIB, soit environ 38 milliards de dollars d'ici 2017.

De plus en plus, la génomique fournit à toute une gamme de secteurs d'activité canadiens – agriculture, énergie, exploitation minière, foresterie, pêches, aquaculture et santé, pour ne nommer que ceux-là – une science et des technologies d'avant-garde. En ce faisant, elle nourrit la croissance, la productivité, la commercialisation et la compétitivité mondiale, tout en trouvant des solutions à des problèmes liés à la durabilité de l'environnement.

Préparé par AGE Consulting.
Publié par Génome Canada, 2013
© Génome Alberta 2013

Le présent document peut être reproduit en tout ou en partie à des fins personnelles sans autorisation, à condition d'indiquer la source en entier. La reproduction en tout ou en partie à des fins de revente ou de redistribution nécessite toutefois l'autorisation écrite préalable de Génome Colombie-Britannique.

This publication is also available in English.

Génome Canada tient à remercier le gouvernement du Canada pour son soutien constant.

Génome Canada et les six centres de génomique régionaux du pays s'emploient à mettre à profit le pouvoir transformateur de la génomique pour assurer des avantages sociaux et économiques à la population canadienne.

Ce document fait partie d'une série de quatre stratégies sectorielles financées par Génome Canada et codirigées par les centres de génomique. Ces stratégies porteront sur l'agroalimentaire, l'énergie et les mines, les pêches et l'aquaculture de même que la foresterie. Chaque stratégie, élaborée en consultation avec les parties prenantes sectorielles, explique comment le secteur peut tirer un meilleur parti du pouvoir transformateur de la génomique et des disciplines connexes.

Compte tenu de l'empreinte du Canada dans ces secteurs clés des ressources naturelles, le temps est venu pour nos industries de profiter pleinement du pouvoir et des promesses de la génomique.

**De manière générale, notre définition de la génomique comprend les disciplines connexes de la bio-informatique, de l'épigénomique, de la métabolomique, de la métagénomique, de la nutriginomique, de la pharmacogénomique, de la protéomique et de la transcriptomique.*

Pour de plus amples renseignements, visitez
www.genomecanada.ca/fr/strategiessectorielles

TABLE DES MATIÈRES

1. Sommaire	2
2. À propos de l'initiative.....	4
3. Avant-propos	5
4. Stratégie sectorielle en bref	7
5. Introduction	9
6. Importance du secteur de l'énergie et des mines dans l'économie canadienne	11
7. Difficultés techniques que les applications génomiques peuvent résoudre et possibilités qu'elles permettraient d'exploiter	14
8. Réussite des investissements antérieurs du Canada dans les recherches génomiques pour le secteur	22
9. Répercussions socio-économiques de solutions génomiques productives	25
10. Rôle de chef de file et atouts du Canada.....	28
11. Défis et possibilités du secteur à considérer dans la stratégie	30
12. Résumé.....	34
Annexe : participants à l'atelier des parties prenantes.....	35

1. SOMMAIRE

Grâce à l'amélioration, tant sur le plan de la capacité que sur celui des coûts, des outils permettant d'étudier des phénomènes biologiques, un large éventail d'entreprises peuvent mettre à profit les grandes découvertes scientifiques pour faire progresser leurs propres secteurs. Les responsables d'activités liées aux mines¹ et à l'énergie² font depuis longtemps usage de la recherche pour évaluer et mettre en œuvre diverses opérations, depuis l'exploration de l'activité microbienne de sites de puits et de mines jusqu'aux stratégies d'extraction et de transformation, en passant par les traitements d'assainissement de l'environnement. Les progrès scientifiques réalisés depuis le séquençage du génome humain, il y a plus d'une décennie, offrent maintenant, toutefois, des outils modernes grâce auxquels approfondir l'analyse des milieux de ces secteurs, des processus d'extraction et des effets sur l'environnement.

L'augmentation des pressions exercées sur l'environnement et les coûts de même que l'exploitation des ressources et les processus industriels obligent les sociétés d'énergie et les sociétés minières à adopter des technologies concurrentielles pour maintenir leurs avantages internationaux et des activités socialement acceptables. Les industries peuvent révolutionner leurs pratiques et leur influence sur l'environnement en apportant les améliorations multiples que la mise en œuvre de nouvelles biotechnologies rend possibles. Des secteurs industriels comme la santé humaine, la foresterie, les pêches et l'agriculture adoptent les applications génomiques pour connaître et exploiter les fondements génétiques de notre environnement,

mais le secteur de l'énergie et des mines en est encore qu'à ses débuts. Cette situation offre toutefois au Canada une occasion formidable de devenir un chef de file international dans le domaine, par l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie sectorielle unique.

À la suite de conseils d'experts et de nombreuses consultations qui ont abouti à un atelier en mars 2013 et à un sondage de suivi, le processus d'élaboration de la stratégie du secteur de l'énergie et des mines a donné aux parties prenantes de l'industrie, des milieux universitaires, du gouvernement et de la communauté des chercheurs en génomique une meilleure compréhension des besoins commerciaux et environnementaux à cibler par rapport aux sciences « omiques » appliquées (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique, métagénomique, biologie des systèmes et bio-informatique).

Le temps est venu de faire progresser le secteur de l'énergie et des mines en intégrant les découvertes scientifiques récentes et les nouveaux processus biotechnologiques aux activités industrielles actuelles. Pour que cette mise en œuvre soit efficace, les collaborations entre les chercheurs et l'industrie doivent être précédées de communications et de coordination afin que les difficultés commerciales soient pleinement comprises et les améliorations biologiques appliquées au stade de maturité approprié pour obtenir des solutions optimales. La stratégie est donc basée sur les deux piliers suivants :

¹ Aux fins du présent document, les « mines » désignent les entreprises vouées à l'extraction des métaux et des minéraux et ne comprennent pas le charbon et les ressources énergétiques à base d'hydrocarbures telles que le bitume.

² Aux fins du présent document, l'« énergie » désigne les entreprises vouées à l'extraction du charbon et des ressources à base d'hydrocarbures telles que le pétrole, le gaz et le bitume.

- **Favoriser de meilleures communications et un meilleur échange des connaissances.** Les représentants de l'industrie, des organismes de réglementation et des milieux universitaires ont tous convenu qu'il faut améliorer l'échange d'information entre les chercheurs et les experts industriels pour renforcer les possibilités de collaboration et de coordination. L'élaboration d'un plan complet de communication favoriserait une compréhension commune des besoins, des solutions possibles et des analyses de rentabilité de la collaboration. L'intégration d'équipes interdisciplinaires à la gestion de l'énergie et des mines pourrait en outre faciliter et maintenir l'échange de connaissances. La concertation des efforts facilitera l'examen des priorités ciblées de renforcer les capacités (en recherche et en analyse des données) et de mener des projets pilotes, dont les résultats attendus surviendraient dans un délai raisonnable.
- **Se concentrer sur l'élaboration permanente d'applications génomiques concernant des difficultés et des possibilités essentielles et d'un intérêt généralisé.** Les entreprises du secteur ont défini des sujets d'intérêt communs et importants liés à l'application de stratégies « omiques », entre autres des améliorations de la récupération et de la transformation des ressources, et l'assainissement de l'environnement. Des recommandations portaient également sur les sujets d'intérêt à court terme de la surveillance et de la biodétection. Les exploitants de

mines, en particulier, ont exprimé le souhait d'optimiser les applications « omiques » dans des domaines particuliers de la biolixiviation et de la bio-oxydation et les entreprises du domaine énergétique ont fait ressortir les difficultés particulières de la corrosion des pipelines, de l'acidification des puits, des déversements d'hydrocarbures et de l'émission de gaz à effet de serre pour l'atténuation des impacts par des mesures biologiques.

Nous espérons obtenir d'autres commentaires des parties prenantes reconnues, à mesure que la stratégie deviendra un cadre à la collaboration et à la coopération soutenues pour les améliorations apportées dans le secteur à l'aide de la génomique. La stratégie constitue une base solide sur laquelle fonder un dialogue soutenu entre l'industrie, les chercheurs et le gouvernement et un point de départ exhaustif à la détermination des meilleurs moyens à prendre pour faire progresser ce programme innovateur. Grâce à des consultations efficaces auxquelles participeront les décideurs, les exploitants sectoriels, les chercheurs et les collectivités dans lesquelles se déroulent les activités de ce secteur, l'intégration des progrès biotechnologiques pourra offrir au Canada un rôle de chef de file et un avantage concurrentiel pour ces secteurs importants que sont les mines et l'énergie.

*Gifs van Rooijen, Génome Alberta et
Alison Symington, Ph. D., Institut de génomique
de l'Ontario au nom du comité directeur*

2. À PROPOS DE L'INITIATIVE

L'appétit mondial pour l'énergie et des produits de base grandissant avec la population, les riches et abondantes ressources naturelles du Canada demeurent des atouts à l'échelle internationale. De plus, les secteurs de l'énergie et des mines reconnaissent de plus en plus le potentiel des découvertes scientifiques récentes d'améliorer l'extraction, la transformation et la gestion environnementale. Dans son plan stratégique récent, Génome Canada a ajouté l'énergie et les mines comme autres secteurs qui bénéficieraient le plus des applications génomiques. Génome Canada cible déjà les secteurs de la santé humaine, de la foresterie, des pêches, de l'agriculture et de l'environnement. Pour demeurer à l'avant-scène de la prospection dans les secteurs des mines et de l'énergie où la concurrence n'a jamais de répit, le Canada et ses entreprises devront se faire les chefs de file de l'élaboration de stratégies qui favoriseront une utilisation novatrice et durable de ces importantes ressources.

Compte tenu des réussites antérieures et devant le potentiel des technologies « omiques » d'améliorer considérablement les activités dans les secteurs des mines et de l'énergie, deux des centres de génomique régionaux du Canada se sont associés pour présenter cette stratégie d'application des découvertes de la génomique aux secteurs. Génome Alberta et l'Institut de génomique de l'Ontario ont élaboré cette stratégie sectorielle sous la direction d'un comité directeur composé des personnes suivantes :

- Marc Amyot, professeur en sciences environnementales, Université de Montréal
- Soheil Asgarpour, président-directeur général, Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC)
- Susan Baldwin, professeure, Génie chimique et biologique, Université de la Colombie-Britannique
- Alex Bolton, membre du conseil d'administration, Energy Resources Conservation Board

- Eric Cook, directeur général, Conseil de la recherche et de la productivité du Nouveau-Brunswick, Fredericton (Nouveau-Brunswick)
- Elizabeth Haack, consultante, Worley Parsons Canada Services Ltd.
- Magdi Habib, directeur général, CanmetMINES
- Rick Lawrence, consultant et professeur, Lawrence Consulting/Département de l'exploitation minière, Université de la Colombie-Britannique
- Douglas Morrison, président-directeur général, Centre for Excellence in Mining Innovation
- Andrew Stephens, Génome Alberta, membre du conseil d'administration et ex-vice-président principal de Suncor Energy
- Gerrit Voordouw, professeur et titulaire de la Chaire de recherche industrielle du CRSNG en microbiologie du pétrole, Université de Calgary
- Dan Wicklum, président-directeur général, Canadian Oil Sands Innovation Alliance (COSIA)

Un projet de mémoire stratégique sectoriel a servi à orienter une vaste consultation en personne à Toronto, au Canada, les 7 et 8 mars 2013. Des représentants du secteur, des milieux universitaires, du gouvernement, des décideurs, des organismes de réglementation et des Autochtones ont également participé à la révision du document dans sa forme définitive actuelle.

3. AVANT-PROPOS

Nous vivons dans un monde de phénomènes biologiques complexes; toute chose physique est issue de processus chimiques et biologiques combinés qui, ensemble, produisent l'environnement qui est le nôtre. Le secteur des mines et de l'énergie existe dans ce contexte et extrait de l'environnement naturel des produits de base précieux qui servent à différentes fins : métaux et minerais en vue d'une utilisation industrielle et commerciale; hydrocarbures en vue de l'énergie et de la fabrication de produits chimiques. Les processus microbiens agissant à la source de l'extraction ou intervenant dans la récupération sont communs aux deux volets du secteur. Les micro-organismes responsables de la biodégradation du pétrole léger en pétrole lourd vivent dans les dépôts de combustibles fossiles depuis des temps immémoriaux, mais il est aujourd'hui possible de manipuler leur activité et leurs associations pour éviter l'acidification des puits ou la corrosion des infrastructures et de s'en servir pour accroître la récupération du pétrole. Dans le secteur minier, la biolixiviation fait intervenir certains micro-organismes qui améliorent le rendement du minerai concassé et dans certains cas, améliorent la récupération par un multiplicateur de 20³. Dans les deux volets du secteur, l'approfondissement de notre compréhension du milieu naturel duquel sont extraites ces ressources peut aider à soutenir la productivité, à améliorer le taux de récupération et à réduire l'ampleur des effets sur l'environnement.

Pour approfondir les connaissances et utiliser les améliorations dans la pratique, il faut une compréhension approfondie des difficultés avec lesquelles l'industrie doit composer ou des possibilités qu'elle doit saisir, élaborer une solution dont le principe aura été efficacement validé et mettre en valeur le potentiel jusqu'au point de

l'application industrielle. En collaborant, les chercheurs peuvent prêter main-forte au secteur dans ses activités par les connaissances acquises à la suite des récentes percées technologiques, et l'industrie peut ouvrir une fenêtre au travers de laquelle envisager les applications potentielles (et ainsi motiver la pertinence de la recherche), et fournir une voie à l'application directe des résultats de la recherche en procédés industriels.

Pour compléter la recherche-développement (R-D) commerciale, des chaires de recherche industrielle ont été créées pour orienter les activités théoriques dans le secteur. L'industrie connaît les secteurs où il serait possible d'apporter des améliorations et les chercheurs universitaires ont déjà fait des progrès en biosurveillance et en biorestauration. Notre compréhension grandissante des procédés environnementaux et de leur véritable complexité aide à orienter les applications « omiques » les plus efficaces dans le secteur de l'énergie et des mines. À la suite de progrès récents de la capacité technologique, par exemple le séquençage du génome humain, le domaine de la génomique est maintenant plus à même de contribuer que jamais. La génomique, qui a décodé de nombreux mécanismes de la vie, a pris de l'ampleur et s'est enrichie d'un ensemble complet de technologies « omiques ». Il est maintenant possible de déterminer, à l'aide de ces outils perfectionnés, l'activité biologique dans les sites miniers et les puits de pétrole, dans le contexte d'infrastructures industrielles et d'installations de traitement et au cœur des efforts de restauration. La caractérisation de processus biologiques uniques continuera de progresser, facilitée par les partenariats conclus par la R-D industrielle et la recherche universitaire, pour s'assurer que les orientations futures demeurent pertinentes par rapport aux applications dans la pratique. Même si les

³ McPhee, J. 2011. The little workers of the mining industry. *The Science Creative Quarterly*, 6.

investissements en R-D peuvent sembler un volet théorique ou facultatif du portefeuille commercial, leur potentiel d'amélioration des indicateurs clés du rendement n'a jamais été meilleur. La collaboration entre les chefs de file en recherche et les exploitants industriels peut influencer sur les limites de la productivité commerciale, aider à restreindre les coûts, améliorer le rendement sur le plan environnemental et contribuer à accroître la crédibilité auprès du public.

À une époque où la sensibilisation aux changements climatiques a accentué l'attention sur une récupération efficace et une empreinte écologique moindre, le public exige une plus grande responsabilité sociale de la part des entreprises. Les organismes de réglementation provinciaux et fédéraux doivent être au courant des avantages que procurent les progrès scientifiques, étant donné que de meilleures mesures environnementales (plus précises) peuvent aider à améliorer les directives de réglementation et offrir aux entreprises la possibilité de se conformer de façon plus fiable. Les chercheurs de l'industrie et des universités ont beaucoup à offrir aux activités sectorielles et aux résultats pour l'environnement.

4. STRATÉGIE SECTORIELLE EN BREF

VISION

Amélioration considérable du rendement économique, environnemental et sociétal des activités du secteur de l'énergie et des mines au Canada et à l'étranger, grâce à l'application d'innovations génomiques.

PRINCIPES DIRECTEURS

Effet de levier. Miser sur l'esprit d'entreprise des organisations industrielles en place et les efforts dans des secteurs comparables afin d'appliquer le plus efficacement possible les connaissances dans tous les domaines de la pratique et de la politique.

- **Harmonisation.** La stratégie s'harmonisera avec les priorités sectorielles connues et n'appuiera que les initiatives de recherche ciblées qui bénéficient de l'appui et de la participation de l'industrie.
- **Équilibre.** Une approche mesurée sera adoptée à l'égard des initiatives collaboratives à court, à moyen et à long terme et elle tiendra compte de la nécessité de résultats de la recherche fondamentale, d'essais pilotes et d'études sur le terrain.
- **Participation.** Les initiatives seront axées sur la participation globale des parties prenantes, faciliteront la collaboration et la coordination entre les activités des groupes canadiens et internationaux et feront le lien avec les collectivités dans lesquelles l'industrie et la recherche ont lieu.
- **Réponse.** Les applications génomiques cibleront les difficultés et les possibilités prioritaires du secteur et feront appel aux parties prenantes des collectivités pertinentes pour s'assurer que la stratégie répond à la demande d'une intendance responsable.

- **Intégration.** Des solutions exhaustives seront élaborées à partir d'une approche interdisciplinaire qui favorisera l'intégration dans les disciplines scientifiques, les paradigmes sociétaux et les organismes sectoriels.

RÉSULTATS STRATÉGIQUES

La stratégie donne une vision et propose une orientation pour s'assurer de la collaboration dans les domaines où il est prioritaire d'élaborer des technologies et ce, dans les buts suivants :

- orienter de manière stratégique les investissements dans la recherche en génomique et l'innovation;
- déterminer les atouts actuels du secteur et en tirer profit, en veillant à la complémentarité des activités et des investissements futurs;
- favoriser l'intégration des découvertes de la génomique dans les activités et la réglementation actuelles et futures du secteur de l'énergie et des mines afin d'assurer un meilleur rendement sur le plan environnemental et industriel et plus d'avantages pour la société.

L'AVENIR

La stratégie sectorielle mettra de l'avant des initiatives ciblées dans les domaines suivants :

- **Alimenter le climat des affaires pour accélérer l'adoption des améliorations génomiques dans les activités du secteur de l'énergie et des mines**
 - » *Jouer un rôle de chef de file.* Favoriser une vaste alliance d'organismes influents dans le monde de l'énergie, des mines et de la génomique qui défendront la vision et la porteront.
 - » *Développer les compétences.* Promouvoir une meilleure compréhension entre les chercheurs et l'industrie et appuyer la création d'équipes interdisciplinaires.

- **Accroître la collaboration et l'harmonisation entre la recherche et l'industrie**

Démontrer l'influence de la génomique sur les difficultés et les possibilités prioritaires. Mettre en place des mécanismes pour reconnaître, appuyer et diffuser les résultats des projets pilotes, par exemple une meilleure récupération, une extraction moins intensive des ressources, une restauration accélérée et une meilleure conformité réglementaire.

- **Mettre en valeur l'infrastructure génomique et le capital intellectuel du Canada**

Créer une nouvelle valeur grâce aux applications génomiques perfectionnées. Approfondir le savoir fondamental en génomique du Canada et améliorer son application dans l'industrie afin de mettre en place des solutions efficaces basées sur les sciences biologiques.

5. INTRODUCTION

L'augmentation considérable de la population mondiale et l'urbanisation rapide font prévoir une augmentation de 50 % de la demande mondiale d'énergie et de ressources naturelles au cours des 25 prochaines années⁴. La contribution collective à l'économie mondiale⁵ de nombreuses nations établies et émergentes devrait atteindre 800 millions de citoyens de la « classe moyenne », ce qui nécessitera une expansion considérable de la production d'énergie et de la fabrication de produits de base. Le climat économique et politique stable du Canada, les riches gisements de ressources naturelles et la capacité de transformation industrielle et de recherche scientifique bien établie du pays le placent dans une position idéale pour la mise au point de technologies et la compétitivité sur les marchés. Il faut déjà toutefois de nouvelles biotechnologies pour relever les défis fondamentaux auxquels font communément face les entreprises des secteurs de l'énergie et des mines de nos jours. Le déclin des réserves facilement accessibles exige de nouvelles technologies pour prolonger la vie des actifs vieillissants, chercher de nouveaux gisements et accroître la récupération de manière économique. Par ailleurs, l'intensification d'une production soumise à des règlements de plus en plus stricts exige des solutions technologiques novatrices qui résoudront les effets persistants sur l'environnement. L'amélioration des activités du secteur de l'énergie et des mines par la génomique offre au Canada l'occasion d'améliorer ses produits intérieurs et de faire valoir son rôle de chef de file international dans un secteur qui représente déjà 1,25 billion de dollars⁶.

Depuis toujours, le secteur utilise des consortiums microbiens pour accélérer la lixiviation et assainir l'eau contaminée dans l'exploitation des mines et limiter la dégradation pendant la production pétrolière. De plus, des plantes, des champignons, des algues et d'autres espèces biologiques pourraient jouer un rôle plus important dans l'assainissement de sites du secteur de l'énergie et des mines. Les percées très récentes de la génomique permettent d'améliorer les procédés industriels grâce aux connaissances approfondies des communautés microbiennes indigènes en cause et à une meilleure compréhension de leur interaction avec l'environnement. Nous pouvons maintenant décrire en détail les constituants microbiens et déterminer les voies biochimiques des procédés, ce qui permet d'isoler des organismes ou leurs activités pour une application industrielle plus poussée et une meilleure surveillance de l'environnement. Les sciences « omiques » qui visent à élucider les détails moléculaires des processus naturels et des organismes vivants ont considérablement progressé depuis le séquençage du génome humain en 2001 : la génomique permet maintenant l'analyse de l'ADN complet d'un organisme; la transcriptomique étudie les voies vers les fondements codés par l'ADN; la protéomique porte sur les fondements qui en résultent et les protéines constituées à l'échelle cellulaire; la métabolomique étudie l'ensemble complet des produits métaboliques d'un organisme; la métagénomique définit toute la matière génétique présente dans un échantillon environnemental; la biologie des systèmes combine toutes ces technologies pour comprendre le lien et la

⁴ Agence internationale d'énergie. Perspectives énergétiques mondiales, 2007. OCDE.

⁵ O'Neill, J., Lawson, S. et Purushothaman, R. 2004. The BRICs and global markets: crude, cars and capital. Goldman Sachs CEO Confidential, 2004-09.

⁶ Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). 2012. Statistique Canada. <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/n26>. Accès le 26 septembre 2012.

fonction des éléments biologiques d'un système; et finalement, la bio-informatique applique l'informatique à l'étude et à la vérification de la recherche biologique⁷. L'industrie pourrait grandement tirer profit de l'application de ces technologies à des questions telles que l'extraction intensive des ressources, la gestion à grande échelle des déchets, le drainage minier acide, la corrosion des pipelines, l'acidification des opérations de production pétrolière et la gestion des déversements d'hydrocarbures. Les technologies « omiques », sous forme de biodétecteurs, peuvent également aider les organismes de réglementation à s'acquitter de leurs fonctions d'évaluation et de surveillance. La R-D industrielle s'est déjà associée à des chercheurs universitaires et a déjà utilisé des fonds provinciaux, fédéraux et industriels pour améliorer la récupération des ressources, le traitement des déchets et l'assainissement des sites, mais il serait possible de faire plus pour intégrer les tout derniers progrès de la génomique aux activités du secteur pour répondre à la demande future.

La base de compétences spécialisées, d'infrastructures et les antécédents avérés du Canada dans ces technologies « omiques » ouvrent la voie à un approfondissement des connaissances et des ressources technologiques pour des applications futures. Des groupes des diverses régions canadiennes au pays ont déjà créé des bases

de données informatiques qui peuvent servir de fondement, conçu des outils biologiques pour la surveillance et l'assainissement et facilité leur mise en œuvre dans l'industrie. Les progrès et les applications qui viendront après ces réussites devront toutefois être issus de la concertation de l'industrie, des milieux universitaires, du gouvernement et d'autres parties prenantes intéressées. La présente stratégie sectorielle mise sur les forces nationales importantes et les investissements de la dernière décennie, dont le soutien stratégique continu des infrastructures de la génomique par Génome Canada et d'autres, et elle est fondée sur un vaste processus de consultation. Pour que le Canada conserve son avantage concurrentiel, nous devons déterminer comment nous favoriserons la recherche axée sur la collaboration par des partenariats public-privé et comment nous réussirons à appliquer avec efficacité notre meilleure compréhension des processus microbiens et écologiques pour résoudre les problèmes industriels et environnementaux. Ainsi, le Canada sera à l'avant-scène pour répondre aux besoins en croissance de l'énergie et des produits de base, de la création d'emploi et du bien-être futur.

⁷ Les sciences « omiques » (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique, métagénomique, biologie des systèmes et bio-informatique) sont définies plus amplement dans une autre note de bas de page, à la page 15.

6. IMPORTANCE DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE ET DES MINES DANS L'ÉCONOMIE CANADIENNE

Le Canada est un chef de file mondial de la production d'énergie, de métaux et de minéraux. Ses réserves pétrolières et gazières se classent au troisième rang en importance dans le monde, tout comme sa production d'énergie qui occupe aussi le troisième rang dans le monde⁸. Une abondance de gisements métalliques et minéraux en fait en outre l'un des cinq premiers producteurs de produits de base essentiels à l'industrie⁹. Le secteur de l'énergie et des mines génère déjà 126 milliards de dollars d'exportations et représente 11 % du PIB⁶. Il emploie 1,4 million de Canadiens¹⁰ et il est l'employeur privé le plus important d'Autochtones¹¹. Au cours des dix à vingt prochaines années, l'industrialisation accélérée de pays comme le Brésil, la Russie, l'Inde et la Chine (le groupe « BRIC ») viendra ajouter les besoins de 800 millions de citoyens « de la classe moyenne » à la demande mondiale actuelle d'énergie et de ressources. Cette croissance fera doubler la demande de combustibles fossiles et accroîtra le marché des métaux et des minéraux⁵, ce qui rendra cet important secteur canadien indispensable aux besoins prévus de l'expansion mondiale.

Les combustibles fossiles constituent actuellement 80 % de l'offre mondiale d'énergie¹², et ils sont la source de 90 % des produits chimiques industriels fabriqués¹³. Même si le Canada est le sixième producteur pétrolier en importance et qu'il répond actuellement à 25 % des besoins des États-Unis, ces réserves traditionnelles ont plafonné en 2003. Si tout le pétrole brut contenu dans le gisement d'hydrocarbures le plus considérable du monde, les sables bitumineux de l'Athabasca, était techniquement récupérable, le Canada dépasserait le Moyen-Orient pour ce qui est des réserves pétrolières futures du monde¹⁴. Comme les besoins mondiaux en hydrocarbures augmenteront de presque 40 % au cours des 25 prochaines années (pour passer à 116 millions de barils par jour¹⁵), le gouvernement canadien retirera environ 500 milliards de dollars en redevances provinciales, alors qu'il génère près de 5 % de la demande mondiale¹⁷. Les percées technologiques dans l'extraction non traditionnelle du gaz de schiste ont fait passer la capacité énergétique du Canada au-delà de l'offre de gaz naturel des 70 dernières années¹⁶, mais il faut d'autres innovations pour exploiter durablement ces ressources. L'industrie

⁸ Canada. 2012. U.S. Energy Information Administration. http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips_CA. Accès le 29 septembre 2012.

⁹ L'industrie minière canadienne: Opportunities through Mergers & Acquisitions. Deloitte et Touche s.r.l. Accès le 4 octobre 2012.

¹⁰ Profil du secteur des services pétroliers et gaziers. Industrie Canada. <http://www.ic.gc.ca/eic/site/ogt-ipg.nsf/eng/og00199.html>. Accès le 16 septembre 2012.

¹¹ Meyes, R. 2012. The Importance of Research and Development Investing for Canada's Mining Industry. L'association minière du Canada.

¹² Carte routière du charbon propre. 2008. Ressources naturelles Canada. <http://canmetenergie.rncan.gc.ca/combustibles-fossiles-propres/charbon-propre/2345>. Accès le 16 septembre 2012.

¹³ DeBruyn, R. et coll. Residual oil deposits as a substrate for methane geobioreactors. Luca Technologies LLC. Présentation. Accès le 27 septembre 2012.

¹⁴ Reynolds, N. 2012. Even Canadian's don't comprehend what they're sitting on. *The Globe and Mail*, le 6 septembre 2012.

¹⁵ Carburants de l'avenir et leurs émissions, 2009. Ressources naturelles Canada. <http://canmetenergie.rncan.gc.ca/sables-bitumineux/1606>. Accès le 16 septembre 2012.

¹⁶ Stringham, G. 2011. Canada's oil & natural gas. Présentation devant la Canadian Association of Petroleum Producers.

¹⁷ The facts on oil sands. Canadian Association of Petroleum Producers. <http://www.capp.ca/UpstreamDialogue/OilSands/Pages/default.aspx>. Accès le 4 octobre 2012.

pétrolière emploie actuellement 75 000 personnes, l'industrie gazière en emploie 172 000 et quelque 800 000 employés travaillent dans l'industrie des services pétroliers et gaziers. Collectivement, ces secteurs comptent plus de 5 % de la main-d'œuvre canadienne^{9,17,18}. La recherche de nouveaux progrès fera en sorte que les possibilités d'emploi continueront de croître grâce à la mise au point de procédés durables et concurrentiels d'extraction et de récupération des ressources.

Les deux tiers des gisements de combustibles fossiles au Canada¹² sont constitués de charbon. Outre le charbon, la production minérale au Canada en 2011 a représenté 45 milliards de dollars en raison de l'extraction de produits de base tels que la potasse, l'uranium, le nickel, le cobalt, le titane, l'aluminium et le platine. Au premier rang des dépenses mondiales au titre de la prospection, plus de 800 exploitations comptent pour presque 20 % des exportations canadiennes (huit fois plus que la foresterie et deux fois plus que la contribution de l'agriculture). Un quart des 360 000 Canadiens qui travaillent dans les mines possèdent un diplôme universitaire et ont acquis une compétence spécialisée considérable en raison des investissements substantiels de l'industrie dans la R-D^{9,19}.

Il faudra d'autres percées pour atténuer les très fortes pressions exercées sur l'environnement à cause de l'augmentation de la production⁵. Déjà, des chercheurs et l'industrie canadienne s'efforcent d'améliorer la gestion des résidus miniers des 170 km² de bassins dans les sables bitumineux de l'Athabasca²⁰, et trouvent des moyens d'atténuer les émanations toxiques des activités minières. La hausse de la demande énergétique devrait entraîner une augmentation correspondante de 60 % des émissions de CO₂¹⁵, et les travaux d'avant-garde réalisés au Canada en matière de gestion des émissions liées aux changements climatiques pourraient aussi offrir au monde des solutions stratégiques indispensables; des entreprises albertaines dont les émissions dépassent les plafonds autorisés pourraient se conformer à la réglementation en contribuant à un fonds qui appuie l'innovation et le déploiement de nouvelles technologies. En plus d'incitatifs évolutifs offerts aux entreprises pour qu'elles réduisent leurs émissions, les promoteurs de projets financés doivent démontrer que ces derniers contribueront à réduire les gaz à effet de serre²¹. Le rôle intrinsèque de constituants microbiens dans les procédés utilisés par le secteur de l'énergie et des mines donne à penser à l'industrie comme aux chercheurs que les sciences « omiques » ont le

¹⁸ The facts on natural gas. Canadian Association of Petroleum Producers. <http://www.capp.ca/UpstreamDialogue/NaturalGas/Pages/default.aspx>. Accès le 4 octobre 2012.

¹⁹ Commerce international canadien par industrie (codes du SCIAN). 2011. Données en ligne sur le commerce/Industrie Canada. Accès le 16 septembre 2012.

²⁰ Campbell, D. 2012. How tiny bacteria could cleanse oil sands tailings: researchers look to biofilms for help with reclamation. Alberta Oil – the business of energy. <http://www.albertaoilmagazine.com/2012/03/detox/>. Accès le 17 septembre 2012.

²¹ Climate Change and Emissions Management (CCEMC) Corporation. The CCEMC grand challenge: innovative carbon uses. <http://ccemc.ca/>. Accès le 30 mai 2013.

potentiel d'aider à résoudre les difficultés mondiales qu'engendrent les activités de ce secteur. Étant donné le déclin des gisements d'hydrocarbures, de métaux et de minerais facilement accessibles et la nécessité de trouver de nouveaux moyens de s'assurer d'un approvisionnement permanent, le Canada devra amplifier la mise au point de technologies dans le secteur pour mieux comprendre les milieux complexes des exploitations et maintenir les rendements essentiels en énergie et en produits de base tout en en réduisant au minimum les effets.

De nouvelles politiques provinciales et fédérales ont également fait naître la possibilité d'intensifier la prospection de gisements d'hydrocarbures et de produits de base, en particulier maintenant que s'ouvre l'accès au Nord souverain du Canada. Notre pays possède la côte arctique la deuxième en importance et il faut de nouvelles données et de nouveaux outils pour rivaliser là-bas dans la course internationale qui s'annonce pour les ressources naturelles²². Malgré d'humbles débuts, à l'époque où les dures réalités géologiques ont dissipé les mythes de riches gisements d'hydrocarbures, les dépôts de l'Arctique suscitent de

nouveau l'intérêt en raison de la prospection plus accessible et de nouvelles technologies qui pourraient venir à bout d'obstacles auparavant insurmontables²³. En prévision de ce potentiel, le gouvernement canadien a mis aux enchères, en 2012, 905 000 hectares pour des droits de prospection au large des côtes, soit une expansion de 30 % de la région déjà louée à bail (par le passé, les enchères ont donné lieu à des droits de forage dont la valeur a atteint 1,2 milliard de dollars dans cette région²⁴). Ces perspectives sont toutefois atténuées par l'obligation réglementaire de prévoir des protocoles exhaustifs de gestion des catastrophes, ce qui demeure difficile à faire dans le climat rigoureux de l'Arctique. Des progrès scientifiques récents ouvrent des possibilités importantes d'explorer le plein potentiel du secteur canadien de l'énergie et des mines en mettant à profit la technologie optimisée en fonction de ces extrêmes. La mise en œuvre de ces progrès peut améliorer l'extraction dans les gisements actuels et futurs du Grand Nord, ce qui donnera aux Canadiens un moyen d'assurer des emplois et de produire des recettes, compte tenu de la demande mondiale exponentielle de produits de base accessibles.

²² Lytvynenko, A. 2011. Arctic sovereignty policy review. Comité spécial sur l'Arctique du Comité directeur des sous-ministres.

²³ Jaremko, G. 2008. Arctic fantasies need reality check. *Edmonton Journal*, le 4 avril 2008.

²⁴ Vanderklippe, N. Reviving Arctic oil rush, Ottawa to auction rights in massive area. *The Globe and Mail*, le 16 mai 2012.

7. DIFFICULTÉS TECHNIQUES QUE LES APPLICATIONS GÉNOMIQUES PEUVENT RÉSOUDRE ET POSSIBILITÉS QU'ELLES PERMETTRAIENT D'EXPLOITER

La nécessité de solutions de rechange plus durables que les approches traditionnelles se fait de plus en plus pressante en raison des normes réglementaires et sociétales de plus en plus strictes pour les exploitations du secteur de l'énergie et des mines. Les provinces canadiennes réagissent aux préoccupations du public concernant les procédés d'exploitation intensive des ressources en resserrant la réglementation en vigueur dans le secteur; la *Directive 74* récemment adoptée par l'Alberta, par exemple, exige un changement énergétique de la gestion des résidus des sables bitumineux pour accélérer la fermeture des bassins de résidus actuels et futurs²⁵. Des chaires de recherche fédérales et industrielles, des organismes fédéraux de recherche comme CanmetÉNERGIE et des consortiums industriels de collaboration comme L'association minière du Canada et la Canadian Oil Sands Innovation Alliance fournissent à l'industrie des moyens technologiques. Aucun organisme n'a toutefois à lui seul la capacité de mettre entièrement au point les biotechnologies dont le secteur a besoin. En plus de l'informatique, de la biosurveillance et des innovations utiles à l'industrie mises au point au Canada, les progrès internationaux réalisés en Suisse (biolixiviation), en Afrique du Sud²⁶ (bioaccumulation), en Inde²⁷, aux Pays-Bas²⁸ et au Japon²⁹ (biorestoration)

se sont multipliés récemment et comprennent des progrès importants réalisés en Finlande (première biolixiviation commerciale en Europe), en Chine (recherche sur la biohydrométallurgie) et au Chili (traitement thermophile rapide à l'échelle industrielle³⁰). La coordination des efforts des chefs de file mondiaux dans les milieux universitaires et l'industrie pourrait être fort utile. Une collaboration internationale accrue pourrait assurer globalement des approvisionnements durables en énergie et en produits de base. Déjà en Europe, 27 partenaires de 11 pays (représentant 70 % de la production de métaux en Europe) ont formé un consortium qui examinera les améliorations industrielles qui permettraient de surmonter la forte dépendance à l'égard des importations³¹.

Des collaborations entre l'industrie et les chercheurs dans le cadre de partenariats public-privé ont fait naître toute une gamme d'outils intégrés, notamment des logiciels de modélisation géochimique, des calculateurs pour l'évaluation des risques environnementaux, des modèles de bioréacteurs et la détermination d'agents de phytoremédiation efficaces. Évidemment, la mise en œuvre de tout outil dépend de son rapport coût-efficacité final, compte tenu de la demande du marché, des frais

²⁵ Louie, J. 2009. New directive on tailings ponds sets the bar high for oilsands mining companies. *AirWaterLand*.

²⁶ Rawlings, D.E. 2002. Heavy metal mining using microbes. *Annual Review in Microbiology* 56:65-91.

²⁷ Mathiyazhagan, N. and Natarajan, D. 2011. Bioremediation on effluents from magnetite and bauxite mines using *Thiobacillus* spp and *Pseudomonas* spp. *Bioremediation & Biodegradation*, 2(1) : 1000115.

²⁸ Kuyucak, N. 1997. Minerals bioprocessing, biorecovery and bioremediation in mining. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 19(1):1-4.

²⁹ Heavy metals and acid rock drainage: a select literature review of remediation and recommendations for applied research. 2004. EBA Engineering Consultants Ltd.

³⁰ Biohydrometallurgy 2012 Conference Diary <http://min-eng.blogspot.co.uk/2012/06/biohydromet-12-conference-diary.html>. Accès le 16 décembre 2012.

³¹ The ProMine Project. <http://promine.gtk.fi/index.php/about>. Accès 16 décembre 2012.

d'installation, de la facilité de fonctionnement, de la faisabilité dans un milieu écologique réel et de toutes les contraintes réglementaires ou sociétales^{29,32}. Depuis toujours, l'industrie utilise des processus microbiens pour améliorer de nombreuses activités dans le secteur de l'énergie et des mines. Ces processus ont cependant été plus ou moins efficaces, car les technologies ont souvent été conçues sans compréhension approfondie des microbes en cause ou de leurs interactions avec les procédés industriels et l'environnement.

Les progrès récents des sciences « omiques » (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique, métagénomique, biologie des systèmes et bio-informatique³³) permettent maintenant d'analyser le plein potentiel génétique des constituants microbiens. La complexité des processus naturels peut mieux se comprendre et des biotechnologies plus efficaces sont mises au point pour rendre les exploitations de plus en plus efficaces, efficientes et écologiques. Une meilleure compréhension des microbes en cause dans les procédés comme les cycles du fer et du soufre qui influencent les opérations minières²⁶ ou la transformation méthanogène des hydrocarbures³⁴ peut faciliter le perfectionnement de la biolixiviation, de la bioaccumulation et de la valorisation

pour une meilleure extraction des métaux et des minerais; elle peut aider aussi à améliorer la récupération des hydrocarbures, à éviter la biocorrosion des infrastructures ou à atténuer les répercussions sur l'environnement par la biosurveillance et la biorestauration. En investissant modestement, l'intégration des applications biologiques peut souvent procurer des améliorations calculées en pourcentages qu'il vaut la peine d'explorer : une récupération de 5 à 10 % de plus du pétrole^{35,36}, un rendement 20 fois plus grand de l'oxydation biologique de l'or³, une réduction de moitié des gaz à effet de serre des bassins de résidus³⁷ ou une correction de 10 % qui favorise un pH plus souhaitable des sols contaminés³⁸.

Les listes suivantes de difficultés observées dans le secteur décrivent également les possibilités qui s'offrent aux Canadiens de devenir les instigateurs de solutions génomiques à des problèmes communs : un faible taux de récupération, une consommation élevée d'eau et d'énergie et des effets potentiellement néfastes sur l'environnement, pour ne nommer que ceux-là. Soucieux de ne pas refaire des promesses que les technologies antérieures n'ont pas pu tenir, le Canada doit miser sur les derniers progrès des sciences « omiques » et les applications préliminaires fructueuses en les intégrant

³² Dosh, S.M. 2006. Bioremediation of acid mine drainage using sulfate-reducing bacteria. Agence américaine de protection de l'environnement.

³³ Définitions : génomique (étude du génome complet d'un organisme, c.-à-d. de toute l'information héréditaire codée dans l'ADN); transcriptomique (étude du transcriptome, l'ensemble complet de transcription de l'ARN produit par le génome à un moment ou à un autre); protéomique (étude de l'ensemble complet ou partiel des protéines codées par un génome); métabolomique (étude des produits et des réseaux métaboliques d'un organisme); métagénomique (identification de tout le matériel génétique présent dans un échantillon d'un environnement complexe, p. ex. le sol, l'eau, l'appareil gastrointestinal, composé des génomes de nombreux organismes individuels); biologie des systèmes (combinaison des technologies susmentionnées pour comprendre le lien entre tous les éléments d'un système biologique et leurs fonctions); bio-informatique (science de l'informatique appliquée à la recherche en biologie).

³⁴ Voordouw, G. 2011. Production-related petroleum microbiology: progress and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3):401-405.

³⁵ Rassenfoss, S. 2011. From bacteria to barrels: microbiology having an impact on oil fields. *Journal of Petroleum Technology*.

³⁶ Morrison, J. 2012. Dirty work. American Way. <http://www.americanwaymag.com/oil-degrading-microbes-terry-hazen>. Accès 17 septembre 2012.

³⁷ Ramos-Pradrón, E. et coll. 2011. Carbon and sulfur cycling by microbial communities in a gypsum-treated oil sands tailings pond. *Environmental Science and Technology*, 45(2):439-446.

³⁸ Lefrançois, E. et coll. 2010. Field performance of alder-Frankia symbionts for the reclamation of oil sands sites. *Applied Soil Ecology* 46(2):183-191.

aux technologies existantes, sous la surveillance de collaborateurs interdisciplinaires, pour tirer le plus grand parti possible de l'extraction concurrentielle des ressources naturelles et de l'intendance environnementale.

DIFFICULTÉS COMMUNES À L'ENSEMBLE DU SECTEUR

- **Améliorer la récupération.** Bien que toutes les manipulations microbiennes offrent actuellement des améliorations proportionnelles, une bonne application peut améliorer de manière spectaculaire la récupération dans le secteur : par exemple, tripler la récupération pour une meilleure extraction du pétrole^{35, 36} et obtenir jusqu'à 20 fois plus dans le cas de l'or³. Malgré un examen approfondi des activateurs physicochimiques à la fois dans l'extraction des mines et de l'énergie, l'utilisation des aides biotechnologiques s'est jusqu'à maintenant limitée à quelques succès commerciaux (p. ex., la biolixiviation du cuivre et des efforts modestes de récupération du pétrole).

Si l'on comprend mieux les activités microbiennes qui s'opèrent dans les milieux des ressources naturelles, les sciences « omiques » pourront améliorer l'efficacité des solutions biotechnologiques pour faire augmenter les taux de récupération bien au-delà des niveaux actuels, faibles et en déclin; de passer des essais pilotes à l'utilisation industrielle peut répondre aux préoccupations liées à la stabilité ou à l'ampleur des améliorations. Comme les fournisseurs se résolvent à extraire du minerai accessible de moindre qualité et de réserves en hydrocarbures appauvries, des améliorations même minimales des exploitations anciennes peuvent contribuer à répondre à la demande importante du marché³⁹. Un spécialiste en biotechnologie du secteur minier de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization de l'Australie le confirme : la « biotechnologie a le potentiel de transformer une ressource non rentable en une réserve⁴⁰ ». [Traduction libre]

- **Résoudre le problème de l'extraction à forte intensité de ressources (consommation élevée d'eau et d'énergie).** De grandes quantités d'eau et d'énergie sont utilisées pour diverses activités d'extraction et de transformation dans le secteur de l'énergie et des mines, notamment pour la récupération du brut léger et lourd et la concentration des métaux et des minéraux. Le ratio d'eau chaude utilisée pour extraire le bitume des sables bitumineux est en moyenne de 3 pour 1¹⁷, ce qui exerce une force pression sur l'eau et l'énergie et produit des déchets considérables qui doivent être stockés dans des bassins de résidus (même après le recyclage du système). La récupération des métaux peut, elle aussi, consommer de grandes quantités d'eau en raison de la biolixiviation de type irrigation du minerai accumulé ou de la bio-oxydation de millions de litres de minerai broyé, deux procédés d'usage courant en Amérique du Nord, en Amérique du Sud, en Afrique du Sud, en Australie et en Chine.

La gestion de l'utilisation, du recyclage et du traitement de l'eau dans ces secteurs pourrait être améliorée si l'on comprenait mieux les processus microbiologiques en cause dans l'extraction des hydrocarbures et le regroupement des déchets. De meilleures connaissances des sciences « omiques » pourraient de plus aider les sociétés minières à améliorer le taux de lixiviation des métaux et l'ampleur de l'extraction ou contribuer à développer des bactéries mieux adaptées aux environnements de lixiviation (résistantes à l'agitation dans les cuves, aux températures de transformation élevées, à l'acidité, à la toxicité du métal, etc.^{3,27}).

- **Accélérer l'assainissement.** La biorestauration utilise des agents biologiques pour traiter les contaminants, par exemple l'acide naphthénique des bassins de résidus ou des métaux lourds des effluents, pour

³⁹ Zitha, P. et coll. 2011. Increasing hydrocarbon recovery factors. Livre blanc de la Society of Petroleum Engineers.

⁴⁰ Earls, E. 2012. Mineral-munching microbes: the future of metal mining? Mining-technology.com

les rendre réutilisables, les écouler ou les éliminer. La phytoremédiation utilise les associations les plus efficaces entre les plantes et les bactéries ou des champignons pour décontaminer les sites pollués. Ces traitements peuvent être utiles au gouvernement fédéral en particulier qui supervise plus de 20 000 sites contaminés retirés des activités minières historiques⁴¹. Des chercheurs de l'Université de Calgary ont déjà conçu un bioréacteur pour le traitement de l'acide naphthénique à l'aide d'une biopellicule de culture qui dégrade le contaminant⁴². L'Institut de recherche en biotechnologie du CNRC s'est associé à Suncor pour vérifier l'efficacité de symbiotes de l'aulne pour l'assainissement des sols⁴³. Syncrude collabore avec des chercheurs de l'Université McMaster à un projet pilote de récupération dans le cadre duquel ils évaluent la biogéochimie du soufre dans les résidus composites⁴⁴. Une installation de biorestauration à échelle réelle est exploitée aux Pays-Bas pour retirer les métaux lourds des effluents miniers⁴⁵ et depuis des décennies, le Canada⁴⁶ et les États-Unis⁴⁷ utilisent avec succès la dégradation microbienne pour retirer le cyanure des effluents miniers métalliques. D'autres études des organismes indigènes dans les sites pollués fourniront d'importantes connaissances sur la diversité microbienne

dans des conditions extrêmes, permettront de repérer de nouveaux isolats qui résistent aux contaminants et de mettre l'information génétique à la disposition des chercheurs pour déterminer les symbiotes qui conviennent le mieux à l'assainissement. Des chercheurs de l'Alberta⁴⁸ et des entreprises de la Colombie-Britannique (BioteQ⁴⁹) et de l'Ontario (BacTech⁵⁰) s'emploient déjà à maîtriser les processus de contamination et tiennent des consultations fructueuses à l'échelle internationale.

- **Améliorer l'évaluation, la surveillance et la conformité.** À chaque étape de l'exploitation, les entreprises du secteur de l'énergie et des mines doivent se conformer à la réglementation provinciale et fédérale en évolution et faire face aux critiques de la société. Des conditions de base sont utilisées pour prévoir et par la suite mesurer les impacts environnementaux, les stratégies d'assainissement et la conformité à la réglementation. Depuis que les gouvernements ont commencé à adopter des lois dans les années 1970, le secteur s'est efforcé de cibler et de résoudre les impacts environnementaux dans ses activités sur le terrain²⁹. Les entreprises doivent toutefois souvent se conformer à des directives générales de surveillance, d'assainissement ou

⁴¹ Inventaire des sites contaminés fédéraux. Gouvernement du Canada. <http://www.tbs-sct.gc.ca/fcsi-rscf/home-accueil-fra.aspx>. Accès le 19 octobre 2012.

⁴² Turner, R. 2012. Direct biofilm culturing for Alberta oil sands tailings pond water remediation. Présentation. Accès le 17 septembre 2012.

⁴³ Greer, C. et coll. Revegetation of reclaimed oil sands sites using alder-Frankia symbionts: Progress after two growing seasons. Conseil national de recherches du Canada. Présentation. Accès le 4 octobre 2012.

⁴⁴ Warren, L., Stephenson, K. and Penner, T. Sulfur biogeochemistry of oil sands composite tailings. Présentation. Accès le 4 octobre 2012.

⁴⁵ Kuyucak, N. 1997. Minerals bioprocessing, biorecovery and bioremediation in mining. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 19(1) : 1-4.

⁴⁶ Baldwin, S. 2012. Université de la Colombie-Britannique. Communication personnelle le 1^{er} octobre 2012.

⁴⁷ Lawrence, R.W. et al. 1998. The potential of biotechnology in the mining industry. *Mineral Processing & Extractions Metallurgy Review*, 19 :5-23.

⁴⁸ Gieg, L. et al. 2011. Microbial activities and communities in oil sands tailings ponds. Présentation, ISMOS-3.

⁴⁹ <http://bioteq.ca>. Accès le 16 décembre 2012.

⁵⁰ <http://www.bactechgreen.com>. Accès le 16 décembre 2012.

de conformité qui peuvent ne pas refléter fidèlement les milieux intrinsèquement complexes dans lesquels elles existent. Depuis toujours, les outils d'analyse limités pour l'évaluation de la toxicologie et des risques potentiels ont restreint l'élaboration de règlements plus utiles. Pour élaborer des lignes directrices qui reflètent mieux la diversité environnementale des mines et des sites d'énergie, il faut des tests efficaces et économiques d'un grand nombre de paramètres, de données sur la toxicité pour un éventail plus large de composés et une meilleure compréhension des modes d'action et des espèces les plus menacées⁵¹. Les entreprises et les organismes de gestion du secteur tireraient profit de meilleurs outils d'évaluation pour orienter l'adoption d'un cadre plus réalisable et efficace et guider les décisions sur la gestion des risques de façon à mieux s'adapter à l'environnement particulier dans lequel ces activités se déroulent.

Les sciences « omiques » pourraient grandement contribuer à l'établissement des données de base, à la surveillance des fluctuations environnementales et à l'évaluation des effets cumulatifs par l'examen d'échantillons microbiens, végétaux et animaux. Le Canada a fait beaucoup de progrès dans la biosurveillance; dans des recherches précédentes, des chercheurs ont élaboré des protocoles basés sur les outils de séquençage de la prochaine génération pour une analyse génomique approfondie d'échantillons environnementaux qui permettront de connaître la santé de l'écosystème. L'Agence américaine de protection de l'environnement des États-Unis

(USEPA) approuve les avantages de l'application des outils génomiques dans l'évaluation des risques et la surveillance de la conformité^{52,53}. Des capacités améliorées de cadrage permettraient de mieux déterminer les paramètres régiospécifiques et la prévision des facteurs de stress environnementaux⁵⁴. Les lignes directrices générales existantes, fondées sur des paramètres d'études de cas limitées⁵⁵ pourraient être perfectionnées pour que des exploitations minières s'y conforment mieux.

Les mises à jour des réglementations fédérales et provinciales ont récemment concentré l'activité de l'industrie sur la collaboration intersectorielle pour établir des solutions durables et se conformer à des critères rigoureux. À l'appui de la *Directive 74* de l'Energy Resources Conservation Board de l'Alberta, Shell a commandité un projet pilote de bassins de résidus de 100 millions de dollars et Syncrude est la première à utiliser une technologie coûteuse qu'elle prévoit partager avec l'industrie et visant l'épaississement par centrifugation des résidus⁵⁶. Des biosurfactants ont aussi été ciblés pour améliorer les traitements des résidus. De plus, une équipe de l'Université de Calgary a récemment reçu une bourse International Genetically Engineered Machine (iGEM) de l'Oil Sands Leadership Initiative (OSLI) pour leur biodétecteur d'acide naphthénique; les bactéries peuvent être un puissant indicateur de la santé de l'écosystème⁵⁷ et l'intégration du potentiel électrochimique pour la quantification de la réponse à un organisme constitue un nouveau niveau scientifique

⁵¹ North, M. and Vulpe, C.D. 2010. Functional toxicogenomics: mechanism-centered toxicology. *Int. J. Mol. Sci.* 11, 4796-4813

⁵² Potential implications of genomics for regulatory and risk assessment applications at EPA. 2004. USEPA

⁵³ Framework for cumulative risk assessment. 2003. USEPA

⁵⁴ Purohit, H.J. et coll., 2003. Genomics tools in environmental impact assessment. *Environmental Science & Technology*, 37(19):356A-363A.

⁵⁵ Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine. 2006. Conseil canadien des ministres de l'environnement.

⁵⁶ Harrison, L. 2009. Oilsands tailings ponds creators respond to new rules. *New Technology Magazine*.

⁵⁷ Taubes, C. 2011. Charles Greer talks about the practicality of bioremediation. <http://archive.sciencemag.com/ana/st/oil-spills/11janSToilspGree/>. Science Watch. Accès le 22 septembre 2012.

d'analyse du changement environnemental⁵⁸. Ces outils devraient avoir une influence fondamentale sur les approches actuelles dans les domaines de la biosurveillance, de la toxicologie, de l'évaluation des risques et, finalement, des cadres réglementaires fédéraux et provinciaux. Avec le temps, les sciences « omiques » peuvent aider à réévaluer la réglementation et la surveillance pour en venir à une évaluation et à une gestion plus exhaustives des effets complexes sur l'environnement. Les entreprises et les organismes de gestion voudront intégrer les progrès les plus récents à leurs trousseaux d'outils.

- **Contre l'effet du vieillissement des actifs.**

De nombreuses exploitations du secteur de l'énergie et des mines extraient leur matière de gisements facilement accessibles et maintenant appauvris. Partout dans le secteur, les taux de récupération varient considérablement de 90 % à un faible 10 %. Des mines perdent des matières précieuses dans les fractions de résidus pendant la transformation et les producteurs d'énergie ne peuvent généralement pas obtenir plus de la moitié des réserves existantes⁵⁹ (et beaucoup moins pour ce qui est des ressources non traditionnelles en hydrocarbures). La diminution de la récupération menace d'entraîner la fermeture prématurée d'exploitations minières dans de nombreuses installations situées dans le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien⁵⁹ et le Bouclier canadien⁶⁰.

Comme l'infrastructure industrielle est déjà en place, des biotechnologies améliorées par la génomique pour une récupération accrue ou la prolongation de la vie des gisements existants pourraient avoir d'importants avantages, si les procédés de production s'en trouvaient améliorés ou si des problèmes coûteux liés aux microbes tels que la corrosion ou l'acidification étaient résolus. Les technologies chimiques traditionnelles pourraient être soit complétées ou remplacées

par des bioflocculants, des biosurfactants et des agents de biosorption.

DIFFICULTÉS PROPRES À L'EXPLOITATION MINIÈRE

- **Atténuer le drainage rocheux acide (DRA ou drainage minier acide, DMA).** La dissolution de stériles et de résidus sulfurés peut former un ruissellement acide délétère contenant des métaux lourds dissous. Le DRA est un problème qui touche des mines métallifères depuis toujours actives et il affecte aux États-Unis 16 094 km (10 000 milles) de rivières et de cours d'eau⁶¹. L'assainissement se fait généralement au moyen d'un composé de base ou récemment, de la manipulation de l'activité de populations microbiennes par l'ajout d'agents chimiques ou de nutriments.

La manipulation biochimique du DRA peut considérablement réduire la nécessité de traitements coûteux de neutralisation; le Japon a ainsi épargné 70 % pour l'assainissement d'une fonderie de cuivre. Des promoteurs ontariens ont d'abord procédé à des tests expérimentaux d'un procédé RAUM (réduction acide utilisant la microbiologie) qui a effectivement réduit les contaminants métalliques dans les lagunes tertiaires, mais même cette technologie a été remplacée⁴⁷. Des combinaisons d'agents chimiques neutralisateurs et de microbes cultivés en laboratoire ont maintenant été brevetées en vue de leur utilisation aux États-Unis et au Canada. Des études menées à l'Université du Wisconsin révèlent en outre que deux bactéries d'origine naturelle catalysent le DRA à des degrés divers, ce qui permettrait de mettre au point des outils prédictifs fondés sur les niveaux naturels de consortiums microbiens dans un site. Les chercheurs du campus Berkeley de l'Université de Californie continuent d'examiner les principaux organismes du DRA, mais il faut mieux comprendre l'effet des

⁵⁸ Naphthenic acids in the oil sands. IGEM, Équipe de Calgary. <http://2011.igem.org/Team:Calgary/Project>. Accès le 29 septembre 2012.

⁵⁹ Fossil fuel infrastructure. 2012. Energy BC. <http://www.energybc.ca/map/fossilfuelinfrastructure.html>. Accès le 21 octobre 2012.

⁶⁰ Miller, E.W. 1959. Mineral regionalism of the Canadian Shield. *The Canadian Geographer*, 4:17-30.

⁶¹ Forum: microbes mediate mining metals. 1998. *Environmental Health Perspectives*, 106(11):A531.

inhibiteurs chimiques sur les constituants microbiens pour déterminer les capacités prédictives réelles de tout outil de gestion des conditions dans un site minier.

- **Faire progresser la biolixiviation et la bio-oxydation.** Des bactéries tout particulièrement efficaces, par exemple *A. Ferrooxidans*²⁷, sont utilisées pour lixivier des métaux précieux en une solution dans le but de les récupérer par électroplaques (biolixiviation) ou de concentrer les solides précieux par la lixiviation des impuretés de faible valeur (bio-oxydation). Ces procédés de la biohydrométallurgie prennent de plus en plus d'importance dans l'extraction des métaux et des minéraux de réserves à faible teneur, étant donné que les réserves à haute teneur sont appauvries.

La biolixiviation produit actuellement près du quart du cuivre dans le monde et la bio-oxydation permet une concentration 20 fois supérieure de l'or avant l'extraction³. Pour faire progresser ce domaine, des bactéries thermophiles dont le rendement est optimal entre 65 et 85 °C ont été isolées et enrichies en vue d'applications commerciales. Une lixiviation considérable par d'autres bactéries extrémophiles à des températures avoisinant 4 °C a également été observée et pourrait être utile pour les nouvelles possibilités qui s'ouvrent dans les réserves de l'Arctique canadien. En plus des bactéries, la diversité microbienne des sites de biolixiviation comprend des champignons et des algues et justifie une analyse métagénomique approfondie pour déterminer la structure optimale des communautés qui assurerait un meilleur rendement industriel, en particulier parce que les mécanismes de composants microbiens renommés ne sont pas bien compris et que le réchauffement

de la planète introduit des variables évolutives pour lesquelles on ne dispose pas encore de données de base^{62,63}. L'organisateur de la Conférence internationale annuelle Biohydromet en 2012 a fait remarquer que : « les progrès rapides de notre compréhension de la science des micro-organismes ont effectivement éveillé la biohydrométallurgie de son long sommeil et il semble maintenant que ce secteur pourrait commencer à réaliser son plein potentiel et à offrir des avantages réels³⁰ » [Traduction libre].

DIFFICULTÉS PROPRES À L'ÉNERGIE

- **Diminuer la corrosion des pipelines.** Il est maintenant bien connu que les bactéries sulfatoréductrices contribuent à la corrosion des pipelines qui transportent l'eau⁶⁴ et que l'injection de nitrate dans l'eau des pipelines peut faire en sorte que les bactéries réductrices de nitrate l'emportent sur les bactéries sulfatoréductrices, diminuant ainsi l'incidence de la corrosion. De récentes études métagénomiques ont révélé que d'autres organismes, par exemple les archées méthanogènes, peuvent également contribuer à la corrosion. D'autres travaux de recherche en génomique visant à établir les composants microbiens clés et les facteurs environnementaux impliqués dans la corrosion permettront aux exploitants de prévoir et de gérer plus efficacement le problème.
- **Traiter l'acidification des puits.** Même si la production de gaz sulfureux (H₂S) pose des problèmes à tous les établissements d'extraction et de transformation, elle est particulièrement problématique lorsqu'on injecte de l'eau pour prolonger la durée productive des réservoirs. Tout comme dans le cas des bactéries sulfatoréductrices qui causent la corrosion des

⁶² Brandl, H. 2001. Microbial Leaching of Metals. Biology Set (2nd Ed) : Chapter 8. Wiley. DOI: 10.1002/9783527620999.ch8k

⁶³ Chandrapralla, M. et Natarajan, K.A. 2010. Microbially induced mineral beneficiation. *Mineral Processing & Extractions Metallurgy Review*, 31:1-39.

⁶⁴ Park, HS. 2011. Effect of sodium bisulfite injection on the microbial community composition in a brackish-water-transporting pipeline. *Applied Environmental Microbiology*, 77(19):6908-6917.

pipelines, les exploitants tentent de limiter l'acidification en introduisant des bactéries réductrices des nitrates dont l'activité est induite par l'ajout de nutriments ou par la suppression biologique non spécifique au moyen de biocides. Une meilleure compréhension des communautés microbiennes complexes présentes dans le puits traité permettra aux exploitants de déterminer le dosage optimal et le meilleur moment pour le traitement, ce qui fera diminuer le coût et améliorera l'efficacité de la lutte contre l'acidification.

- **Atténuer les gaz à effet de serre.** L'activité microbienne explique les grandes quantités de méthane émises par les hydrocarbures résiduels dans les bassins de résidus et les réservoirs de stockage. Vingt fois plus puissant que le CO₂ comme gaz à effet de serre, son émission est attribuable à l'activité des archées méthanogènes³⁴. Malgré son importance, l'un des principaux mécanismes biologiques qui régulent les émissions (oxydation du méthane) n'est pas encore bien caractérisé⁶⁵. Un consortium de chercheurs du Canada, des États-Unis et de la Chine a toutefois séquencé l'un des plus robustes organismes méthanotrophes du monde, extrait d'un champ géothermique de la Nouvelle-Zélande (température optimale de 90 °C⁶⁶), et a depuis étudié les organismes méthanotrophes extraits de sédiments océaniques en permanence froids (températures de -1 °C⁶⁷). Des organismes méthanotrophes anaérobies qui utilisent le nitrate ou le sulfate pour l'oxydation du méthane ont également été isolés. On estime que les organismes méthanotrophes actifs dans les couches de surface des bassins de résidus des sables bitumineux enlèvent jusqu'à 50 % du méthane émis par les constituants microbiens des bassins, mais il faut en savoir plus sur les facteurs qui limitent leurs activités.

- **Nettoyer les déversements de pétrole ou d'hydrocarbures.** Les micro-organismes indigènes qui décomposent les hydrocarbures nettoient communément les rejets naturels d'hydrocarbures avec une efficacité remarquable. Toutefois, les taux d'assainissement varient considérablement lorsqu'il est question de fuites dans le sol, l'océan ou l'Arctique. L'assainissement des sols contaminés peut souvent être accéléré par l'ajout d'un engrais pour stimuler l'activité des bactéries aérobies naturelles. Les microbes marins réagissent par proximité à un suintement de pétrole, les populations réagissant de manière remarquable aux approvisionnements en hydrocarbures. Les organismes capables de décomposer du brut léger dans le golfe du Mexique ont réagi par une augmentation spectaculaire de la population dans le panache de l'explosion de la plate-forme Deepwater Horizon de BP et ont décomposé les hydrocarbures dispersés en quelques jours; le déversement de pétrole brut d'Exxon Valdez en Alaska n'avait toutefois pas ces microbes indigènes de dégradation pour corriger cette catastrophe³⁶. L'assainissement sur place dans le Haut-Arctique canadien implique également d'autres facteurs limitatifs tels que la température, les nutriments essentiels et l'eau disponible⁶⁸. Il faut d'autres travaux pour comprendre les micro-organismes et les gènes fonctionnels qui interviennent dans les taux de biodégradation les plus élevés afin d'optimiser la conception des stratégies d'assainissement les plus efficaces à chaque endroit.

⁶⁵ Hallam, S.J. 2004. Reverse methanogenesis: testing the hypothesis with environmental genomics. *Science*, 305(5689) :1457-1462.

⁶⁶ Hellish hot springs yield greenhouse gas-eating bug. TerraDaily. http://www.terradaily.com/reports/Hellish_Hot_Springs_Yield_Greenhouse_Gas_Eating_Bug_999.html. Accès le 17 septembre 2012.

⁶⁷ Dunfield, P. 2009. Methanotrophy in extreme environments. *Open access*, DOI: 10.1002/9780470015902.a0021897.

⁶⁸ Yergeau, E. et coll., 2012. Metagenomic analysis of bioremediation of diesel-contaminated Canadian high Arctic soils. *PLoS One*, 7(1).

8. RÉUSSITE DES INVESTISSEMENTS ANTÉRIEURS DU CANADA DANS LES RECHERCHES GÉNOMIQUES POUR LE SECTEUR

Le Canada possède une communauté scientifique dynamique et de calibre mondial et plus de 20 projets à grande échelle en génomique ont été financés pour des travaux dans le secteur de l'énergie et des mines. Les chercheurs scrutent l'environnement pour connaître et comprendre les processus biologiques et des outils modernes deviennent toujours plus efficaces et abordables pour recueillir et traiter les données des sciences « omiques ». Des quantités incroyables de renseignements bruts ont été cataloguées, analysées et interprétées afin de transformer les découvertes en avantages directs pour le secteur. Les exemples suivants décrivent des entreprises canadiennes récentes qui peuvent avoir une influence considérable sur les entreprises du secteur de l'énergie et des mines.

LA MÉTAGÉNOMIQUE AU SERVICE D'UNE PRODUCTION ET D'UNE EXTRACTION PLUS ÉCOLOGIQUES DES HYDROCARBURES

Pour fournir une plate-forme à partir de laquelle examiner d'autres améliorations biotechnologiques, le projet de Génome Alberta, de Génome Colombie-Britannique et de Génome Canada a reçu 11,6 millions de dollars pour constituer une base de données métagénomiques pour ce secteur et déterminer « quels organismes s'y trouvent, ce qu'ils font et comment leur action peut nous servir⁶⁹ ». La base de données sur les micro-organismes, les gènes et les processus biologiques a constitué une première étape nécessaire de la mise au point ultérieure des applications biotechnologiques. Les réalisations initiales récentes sont les suivantes :

- **Réduction de la biocorrosion.** On a découvert que l'ajout inutile d'hydrogénosulfites dans les pipelines alimente les bactéries qui génèrent des produits corrosifs. Cette découverte a incité une grande société

du secteur de l'énergie à examiner l'élimination progressive de l'utilisation excessive d'hydrogénosulfites dans un réseau d'alimentation en eau indispensable pour le drainage par gravité au moyen de vapeur dans les sables bitumineux.

- **Limitation de l'acidification d'un champ pétrolifère.** L'analyse métagénomique a révélé que l'injection de nitrates permet de limiter véritablement l'acidification selon la composition et la dynamique des communautés microbiennes indigènes. Des modèles peuvent être élaborés à partir de l'analyse métagénomique pour optimiser le dosage des injections de nitrates et le moment où elles sont faites pour réduire l'acidification le plus efficacement possible. Les résultats de ces travaux sont déjà utilisés par deux sociétés pétrolières albertaines, Suncor au large des côtes et Enerplus sur le continent.
- **Fermeture en toute sécurité d'un bassin de résidus.** L'analyse métagénomique des bassins de résidus a aidé à déterminer les micro-organismes responsables de la densification, de la toxicité et des émissions de gaz à effet de serre. La manipulation des constituants indigènes a permis d'accélérer le recyclage de l'eau, la détoxification des résidus et de l'eau restants, et réduit les effets de serre des gaz. Suncor utilisera l'information obtenue pour s'assurer de fermer les bassins de résidus en toute sécurité.
- **Assainissement des résidus.** Les bassins de résidus contiennent de nombreux composés toxiques, par exemple des acides naphthéniques et du bitume résiduel, qu'il faut assainir avant de pouvoir remettre les bassins en état. L'examen des communautés microbiennes extraites des bassins de résidus a révélé que des micro-organismes sont capables de reconnaître et de décomposer des contaminants. Ces

⁶⁹ Metagenomics for greener production and extraction of hydrocarbon energy. <http://www.hydrocarbonmetagenomics.com/>. Accès le 17 septembre 2012.

micro-organismes sont maintenant isolés et développés en raison de leurs capacités sensorielles et de traitement.

GENOREM : AMÉLIORER LA BIOREMÉDIATION DES SOLS POLLUÉS GRÂCE À LA GÉNOMIQUE ENVIRONNEMENTALE

Le projet GenoRem a reçu 7,8 millions de dollars de Génome Québec et de Génome Canada pour améliorer et mettre au point des technologies écologiques de traitement des sols pollués. L'équipe du projet propose une approche de phytoremédiation novatrice à la décontamination des différents sites pollués. Grâce à l'utilisation des technologies « omiques » récemment mises au point, à leur intégration au domaine traditionnel et aux expériences de biologie moléculaire, GenoRem produira des lignes directrices à l'intention des décideurs et de l'industrie sur les procédés de phytoremédiation respectueux de l'environnement. La détermination scientifique des associations symbiotiques végétales, fongiques et bactériennes les plus efficaces a fait ressortir que l'aster était la plante qui convenait le mieux. Celle-ci, qui vit en étroite symbiose avec de nombreux microbes du sol, est une espèce « pionnière » qui croît rapidement dans des climats difficiles et des sols pauvres, voire pollués. Les protocoles de décontamination du sol mis au point seront plus efficaces que la phytoremédiation traditionnelle parce que les microbes dont l'interaction avec les plantes est connue seront optimisés⁷⁰.

OUTILS GÉNOMIQUES POUR LA SURVEILLANCE ET L'AMÉLIORATION DU TRAITEMENT DU DRAINAGE MINIER

Un financement de Génome Colombie-Britannique, du CRSNG et de l'industrie, totalisant 1,5 million de dollars, a servi à améliorer la conception et l'exploitation de systèmes de traitement passifs des suintements contaminés de métaux et de sulfates dans des sites miniers et des sites de traitement des minerais. Le séquençage de la génération suivante a servi à comparer les microbes de traitements fructueux à des microbes de systèmes

problématiques, ce qui a mené à l'adoption de nouvelles stratégies d'amélioration des traitements. La métagénomique fonctionnelle a servi à cibler et à caractériser de nouvelles enzymes qui interviennent dans la dégradation de la matière organique et la transformation de l'arsenic. Ces enzymes ou les microbes qui les expriment peuvent être intégrés dans de nouvelles technologies qui amélioreront le rendement des systèmes de traitement⁴⁶.

SYMBIOTES DE L'AULNE ET DE LA BACTÉRIE FRANKIA POUR UNE MEILLEURE VÉGÉTALISATION ET L'ASSAINISSEMENT DES RÉSIDUS DES SABLES BITUMINEUX

L'Institut de recherche en biotechnologie du Conseil national de recherches appuie l'élaboration de symbiotes de l'aulne pour l'assainissement sur place de résidus des sables bitumineux. Les aulnes fixent l'azote atmosphérique dans une association symbiotique avec les bactéries et peuvent aussi former des associations mycorhiziennes. En serre, l'inoculation de l'espèce Frankia a considérablement augmenté la biomasse des semis, les nodules racinaires et la teneur en azote de la plante. Après un an seulement sur place dans un site d'assainissement de Suncor, les aulnes inoculés ont montré une augmentation de l'activité microbienne et une capacité d'amélioration des caractéristiques du sol⁴³. La phytoremédiation pourrait s'avérer un traitement intéressant qui accélérerait la récupération des sites miniers hors service.

BIOPRODUITS ET ENZYMES DES MÉTAGÉNOMES ENVIRONNEMENTAUX (BEEM)

Pour mieux comprendre les processus biologiques de la décomposition des polluants dans les sites contaminés, l'Institut de génomique de l'Ontario, Génome Canada et des partenaires ont investi 10,9 millions de dollars dans un projet international. L'équipe d'ingénieurs chimistes, de biologistes et de consultants collabore avec l'industrie pour appliquer leurs connaissances du séquençage

⁷⁰ Burger, G. et coll., 2012. GenoRem: Improving bioremediation of polluted soils through environmental genomics. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(3).

génétique et de la modélisation informatique pour identifier, cribler et analyser des communautés microbiennes capables d'assainir des terres et des eaux contaminées. En comprenant la fonction naturelle de ces agents de recyclage indigènes de décomposer les contaminants, l'équipe a mis au point et commercialisé un consortium microbien (appelé KB-1®) qui est déjà utilisé pour nettoyer les eaux souterraines dans des sites partout dans le monde. Dans le cadre de ce projet, l'équipe prévoit améliorer la durabilité de bioraffineries futures en appliquant les connaissances de la recherche fondamentale et leurs compétences pour mettre au point d'autres procédés basés sur les communautés microbiennes pour transformer, réutiliser, recycler et assainir des contaminants et les sous-produits de procédés industriels courants.

BIOSURVEILLANCE 2.0 : GÉNOMIQUE À HAUT RENDEMENT POUR UNE ÉVALUATION BIOLOGIQUE EXHAUSTIVE

La biosurveillance a pour objet de décrire et de comprendre la diversité biologique à plusieurs niveaux écologiques, tant pour en apprendre davantage sur la diversité d'espèces caractéristiques de différents habitats que pour obtenir des données de base utiles à la détection précoce des agents de stress environnemental avant qu'ils n'atteignent des seuils critiques. Le projet vise à surmonter les limites des pratiques actuelles dans lesquelles la fréquence de l'échantillonnage et son intensité sont limitées par des procédures laborieuses et des méthodologies axées sur un sous-ensemble restreint d'espèces en un lieu donné. « La biosurveillance 2.0 » est un nouveau système qui permet à la fois de réduire les coûts d'échantillonnage et d'accroître considérablement l'information obtenue des échantillons biologiques. Basés sur les technologies d'avant-garde de séquençage de l'ADN et les analyses informatiques les plus perfectionnées, les nouveaux outils et technologies génomiques seront intégrés à

un cadre de biosurveillance bien établi au Canada. Grâce à une étroite coordination entre les parties prenantes des milieux industriel, gouvernemental, autochtone et non gouvernemental, le projet accroîtra considérablement la capacité du Canada de gérer ses ressources naturelles et de demeurer à l'avant-scène de la biosurveillance.

EXPLORATION DE L'ÉCOTOXICOGÉNOMIQUE

La toxicogénomique étudie la façon dont un organisme réagit, à l'échelle génétique, à des substances toxiques de son environnement. Des chercheurs d'Environnement Canada examinent l'utilisation de la toxicogénomique appliquée à des espèces sauvages (écotoxicogénomique), pour connaître les effets de divers contaminants sur les sols, les sédiments, les oiseaux et la vie aquatique. Ils examinent également l'application possible de l'écotoxicogénomique à la surveillance de la santé des écosystèmes pour mettre au point d'éventuels « systèmes de détection anticipés ». Par exemple, des chercheurs d'Environnement Canada et des collègues de l'Université McMaster comparent les mutations génétiques chez certaines espèces qui vivent soit en milieu urbain, soit en milieu rural ou à proximité d'aciéries actives. Les études en cours visent à déterminer les effets de l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et d'autres contaminants de l'environnement. Le catalogage, les analyses et l'interprétation des données issues de la recherche d'écotoxicogénomique peuvent brosser un tableau plus clair des réactions biologiques et de la vulnérabilité aux contaminants, ce qui permettrait de mettre au point des tests personnalisés et des méthodologies d'évaluation des risques⁷¹. Comme l'a publié une fois la revue *Environmental Science and Technology* : « l'intégration fructueuse de la toxicogénomique aux cadres de réglementation peut un jour être considérée comme la contribution intellectuelle et pratique la plus importante de cette génération d'écotoxicologues⁷² » [Traduction libre].

⁷¹ Exploring eco-toxicogenomics. 2008. Environnement Canada. *EnviroZine* 79(2)

⁷² Ankley, G.T. et coll., 2006. Toxicogenomics in regulatory ecotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 40(13) :4055–4065

9. RÉPERCUSSIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE SOLUTIONS GÉNOMIQUES PRODUCTIVES

Les tout derniers progrès de sciences « omiques » peuvent, tout comme les solutions techniques l'ont fait, influencer lentement, mais profondément l'industrie. Il a fallu des décennies pour que l'invention canadienne en 1969 du drainage par gravité au moyen de vapeur révolutionne l'industrie de l'énergie, mais finalement, les exploitants des sables bitumineux ont pu doubler les volumes accessibles de pétrole^{14,73}. Le séquençage du génome humain, il y a plus de dix ans, a facilité des découvertes innombrables dans le domaine biomédical⁷⁴, tout comme les solutions génomiques qui auront fait l'objet de solides recherches et que l'industrie aura facilitées seront appliquées de manière stratégique dans le secteur de l'énergie et des mines. L'utilisation des bactéries pour optimiser les conditions de rendement a déjà amélioré les procédés d'extraction, soit par suspension (p. ex., la biolixiviation³), soit en tant que partie d'un appareil de biopellicule (comme on le propose pour l'assainissement de l'acide naphthénique toxique⁴²). Pour accroître l'activité microbienne et ainsi mieux récupérer le pétrole, les chercheurs ont ajouté des bactéries à haut rendement *in vivo* ou fourni des nutriments pour stimuler la croissance microbienne indigène³⁴. Les études antérieures n'ont cependant pas toujours été rentables, car les chercheurs ont pris le temps de mieux comprendre les environnements microbiens. Maintenant, des réservoirs de brassage de grand volume emploient des bactéries pour concentrer jusqu'à 20 fois plus de métaux précieux³ et la récupération du pétrole, améliorée par les microbes, gagne en crédibilité comme moyen rentable d'augmenter de 5 à 10 % le rendement des hydrocarbures^{35,36}. Le temps est opportun d'intégrer les progrès de la génomique à l'infrastructure technique afin de créer des outils biogéochimiques dont ont besoin les ingénieurs spécialistes de l'étude des gisements et les ingénieurs miniers.

Des avantages socio-économiques indiscutables sont possibles grâce à l'application des technologies « omiques », car elles peuvent améliorer les activités importantes du secteur canadien de l'énergie et des mines : rôle de chef de file dans l'industrie, croissance des exportations, personnel qualifié, diminution des effets sur l'environnement et approvisionnement régulier de produits en forte demande. Les experts reconnaissent que les techniques microbiennes sont prometteuses, si leur faisabilité peut être établie par des tests pilotes et si leur viabilité économique est appuyée par les exigences réglementaires²⁹. On s'attend à ces deux volets dans le secteur à court terme, à mesure que les progrès des technologies « omiques » orienteront les activités sectorielles et que les législateurs mettront de plus en plus en œuvre des règlements constructifs. Les immenses richesses du Canada en hydrocarbures, en métaux et en minerais offrent de grandes possibilités de tirer profit de l'application de la génomique aux difficultés de la prospection, de l'extraction, du traitement et de l'assainissement. Dans une industrie où l'accumulation de capital se chiffre à 620 milliards de dollars sur 99 780 km (62 000 miles) de pipelines, les coûts d'entretien représentent, selon les estimations, 1 % des dépenses annuelles d'exploitation¹⁰. Il pourrait découler des avantages économiques considérables d'un entretien facilité des infrastructures grâce aux analyses des sciences « omiques » du contenu des pipelines. On pourrait également approfondir les connaissances sur tout un ensemble de micro-organismes indigènes qui conviennent à un éventail d'environnements d'exploitation uniques. Lorsque les ressources inexploitées du Canada dans l'Arctique deviendront plus accessibles, les bactéries extrémophiles récemment découvertes pourront servir à explorer de nouvelles possibilités économiques. Le Nunavut continue d'être

⁷³ Lowey, M. 2004. Father of innovation – Roger Butler's SAGD process opened up the oilsands. *University of Calgary News*.

⁷⁴ Lander, E.S. 2001. Initial impact of the sequencing of the human genome. *Nature*, 470(7333):187-197.

le chef de file de la prospection et de la mise en valeur des minerais dans les régions éloignées du Nord. Plus de 11 millions d'hectares ont été loués à bail pour l'exploitation de mines d'or, de diamant, d'uranium, de fer et de métaux de base, ce qui génère presque 500 millions de dollars d'investissements locaux par année⁷⁵. Les initiatives de prospection dans ces régions se font de plus en plus en partenariat avec les peuples autochtones qui occupent des emplois et créent des entreprises. En Alberta, l'Athabasca Tribal Council a facilité la collaboration avec des exploitants des sables bitumineux pour s'assurer que des partenariats étaient conclus pour les avantages à long terme, l'environnement, les infrastructures humaines et physiques, de même que l'emploi et la formation⁷⁶. L'application de la recherche dans ce secteur intéresse de nouveaux talents et forme des Canadiens dans des domaines aussi diversifiés que la microbiologie, le génie chimique et les sciences de la Terre³⁵. Comme ce secteur représente 11 % du PIB, une amélioration de 1 % seulement du rendement représenterait 1,5 milliard de dollars et des emplois pour des dizaines de milliers de Canadiens.

Les progrès technologiques offrent aux gouvernements la possibilité de mieux orienter les normes réglementaires par des données pratiques exhaustives qui reflètent davantage les environnements complexes dans lesquels les entreprises travaillent et donnent l'assurance qu'elles peuvent mettre au point les outils dont elles ont besoin pour réagir efficacement (bien que la mise à l'échelle des technologies au niveau sectoriel accuse actuellement un retard par rapport à la mise en œuvre). Les sciences « omiques » ouvrent une nouvelle voie à l'examen d'autres procédés microbiens qui sont généralement plus

écologiques que les processus physicochimiques actuels^{56,77}. La pression publique qui s'intensifie milite en faveur de la mise au point au Canada de nouvelles approches qui assureront la santé de l'économie, l'intendance de l'environnement et le bien-être de la population canadienne.

Le consortium de recherche financé par Génome Alberta et Génome Canada catalogue actuellement l'information génétique sur les processus microbiens et biologiques et les enzymes responsables de la conversion méthanogène des hydrocarbures⁶⁹. La base de données métagénomique qui en résultera permettra d'examiner en détail le potentiel génétique de l'environnement naturel afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre des bassins de résidus. La réglementation gouvernementale récente a accéléré le mouvement initial de l'industrie dans cette direction; la *Directive 74* de l'Alberta, par exemple, fixe des cibles ambitieuses pour la manipulation et l'élimination des résidus stériles. Les sociétés énergétiques là-bas ont eu à fournir presque un milliard de dollars⁷⁸ en garantie financière pour s'assurer qu'il y avait assez de fonds pour mettre hors de service les sites et soutenir un examen approfondi des technologies possibles de récupération, par exemple la modélisation métabolique de la méthanogenèse inversée. Suncor a été la première société à remplir ses obligations de récupération en assainissant un bassin de 40 ans pour en faire des terres publiques, mais moins de 1 % de la terre perturbée par l'exploitation des sables bitumineux est actuellement conforme aux nouvelles exigences^{56, 77}. Le gouvernement fédéral a la responsabilité de 20 000 autres sites miniers contaminés par des exploitations historiques⁵⁹.

⁷⁵ *Nunavut: uncovering the potential*. 2012. Bureau régional du Nunavut d'AADNC, Direction des ressources minérales, Exploitation minière dans le Nord.

⁷⁶ Rapport de la table ronde des Autochtones et de l'industrie de l'exploitation minière. 2004. L'association minière du Canada/Canadian Aboriginal Minerals Association.

⁷⁷ Valentine, T.E. et Litton, K-L.G. 2011. Alberta's oilsands: the changing landscape of reclamation obligations. Energy Bridge.

⁷⁸ Mine financial security program. Alberta Environment. <http://environment.alberta.ca/03388.html>. Accès, 29 septembre 2012.

L'industrie préconise la collaboration scientifique par la coordination d'essais pilotes et l'échange du savoir⁷⁹. Tant à l'échelle internationale qu'au Canada, les partenariats public-privé deviennent courants pour l'échange de la technologie et de l'expertise. Dans un partenariat de recherche avec l'industrie pétrolière norvégienne, la société américaine Glori Oil a utilisé du financement de la Silicon Valley pour mettre en œuvre une technologie microbienne mise au point en Inde. Au Canada, Dycor Technologies Ltd de l'Alberta utilise le financement du ministère de la Diversification de l'économie de l'Ouest et du gouvernement de la Saskatchewan pour valider un principe exclusif et le faire progresser jusqu'aux essais sur le terrain; des projets fructueux de récupération microbienne du pétrole ont abouti à une analyse et à une amélioration, financées par l'industrie, de l'activité microbienne au fond des puits pour améliorer la récupération. Des partenaires privés collaborent avec le centre de génomique régional pour mettre les données métagénomiques et bio-informatiques à la disposition du public⁷⁹. Ces entreprises correspondent parfaitement

à la définition des partenariats public-privé : la mise en commun des compétences spécialisées pour répondre au besoin public par le partage des ressources, des risques et des avantages⁸⁰. La technologie « omique » mise en œuvre au Canada et à l'étranger permettra à l'industrie et aux gouvernements de s'acquitter de leurs responsabilités fiduciaires de maximiser la production des ressources des gisements disponibles, d'accroître l'accès aux réserves et d'aider à gérer les effets sur l'environnement des exploitations de grande envergure nécessaires si l'on veut répondre aux besoins de la population mondiale croissante. La coordination avec des partenaires internationaux pour ce qui est du financement, des compétences spécialisées et de l'accès aux données et aux innovations commercialisées accroîtra la capacité du Canada d'assurer sa prospérité économique, sociale et environnementale et de veiller à ce que la participation de notre secteur demeure de calibre mondial.

⁷⁹ Keller, W. 2011. Deductive Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) – phase 1A final report. Dycor technologies Ltd. Communication personnelle. 24 juin 2011.

⁸⁰ Définitions du Conseil canadien pour les partenariats public-privé. <http://www.pppcouncil.ca/resources/about-ppp/definitions.html>. Accès le 23 septembre 2012.

10. RÔLE DE CHEF DE FILE ET ATOUTS DU CANADA

En plus de ses abondantes ressources naturelles, le Canada possède des capacités considérables de transformation et d'infrastructures dans le secteur de l'énergie et des mines. Sa solidité en tant que nation exportatrice a créé un réseau de marchés internationaux sûrs. Une économie stable a permis de bien faire face aux récentes incertitudes mondiales et forme le contexte dans lequel le gouvernement s'efforce de rationaliser les processus d'approbation des projets et d'établir des politiques pour une meilleure prospection des ressources. Une assemblée des gouvernements provinciaux est constituée sous la supervision d'un gouvernement fédéral favorable au développement et axé sur la recherche scientifique et les progrès technologiques. Des investissements substantiels dans les infrastructures et les activités de recherche des sciences « omiques » créent les bases sur lesquelles peut s'appuyer le Canada pour diriger la mise en valeur du secteur de l'énergie et des mines. Grâce au cofinancement des concours de recherche successifs des dix dernières années, 150 millions de dollars ont été investis dans quelque 20 projets de recherche connexes au Canada. Depuis la génomique microbienne jusqu'à la métagénomique, depuis la biosurveillance jusqu'aux applications industrielles, les chercheurs d'un bout à l'autre du pays et l'industrie se sont concertés pour réaliser des progrès pertinents. Les réussites récentes comprennent déjà des résultats de recherche sur la biosurveillance, l'assainissement de l'environnement et l'extraction de l'énergie assistée par l'activité microbienne.

Les ressources énergétiques du Canada étaient évaluées à 880 milliards de dollars en 2011 et les actifs minéraux totalisaient 370 milliards de dollars⁸¹. Fortes de ces richesses naturelles, les activités minières sont réparties

également entre les villes et les villages d'est en ouest¹¹, alors que l'extraction des hydrocarbures sur le continent est concentrée dans les quatre provinces du Québec, de l'Ontario, de l'Alberta et de la Colombie-Britannique⁸². Un grand réseau de pipelines, de chemins de fer et de voies navigables crée un accès multimodal aux marchés. En plus du partenaire américain principal pour nos exportations, nos autres marchés d'exportation importants comprennent des représentants des économies en forte expansion du groupe BRIC (soit le Brésil, l'Inde et la Chine), de même que des pays qui connaissent une croissance plus modeste (p. ex., l'Australie, le Japon et la Corée du Sud¹⁹). Des incitatifs importants en vue d'investissements dans la prospection sont offerts sous forme de généreuses réductions et exemptions fiscales; un traité avec la Chine prévoit des taux fiscaux de dividendes aussi faibles que 10 %, les premiers 500 000 \$ étant exonérés d'impôt⁹. Une fois créées, les nouvelles entreprises peuvent fournir des biens dans toute l'Amérique du Nord au moyen d'un réseau très bien établi.

Trois conseils nationaux qui coordonnent le financement fédéral généreux dans les domaines des sciences naturelles et du génie, des sciences sociales et des sciences humaines, de même que de la santé, assurent un soutien solide à la recherche scientifique. Les trois conseils de recherche (respectivement le CRSNG, le CRSH et les IRSC) participent aux coûts liés au personnel et à l'exploitation, et la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) fournit du financement pour des infrastructures et de l'équipement d'avant-garde. Au cours de la dernière décennie, Génome Canada a également investi et mobilisé plus de deux milliards de

⁸¹ Patrimoine en ressources naturelles du Canada, 2011. Statistique Canada, *Le Quotidien*, 6 septembre 2012; <http://www.statcan.gc.ca/daily-quotidien/120906/dq120906a-fra.htm>. Accès le 4 octobre 2012.

⁸¹ Lemphers, N. et Woyillowicz, D. 2012. In the shadow of the boom: How oilsands development is reshaping Canada's economy. The Pembina Institute.

dollars pour les recherches en sciences « omiques » par l'entremise de ses six centres de génomique régionaux qui déterminent collectivement les priorités de recherche qui présentent un intérêt de nature provinciale et nationale. Grâce au soutien à long terme de l'innovation scientifique, le Canada a fait ses preuves en sciences et en technologie; alors que notre pays ne représente que 0,5 % de la population mondiale, il produit presque 5 % des articles les plus fréquemment cités dans le monde⁸³. Même si le Conseil national de recherches du Canada offre son réseau international EUREKA! Pour relier la R-D industrielle à celle de plus de 40 autres pays, on a récemment constaté que les découvertes scientifiques pourraient être mieux transformées en applications. Cette constatation vaut tout particulièrement dans les domaines des ressources naturelles et de l'environnement dans lesquels le rendement des sciences et de la technologie diminue depuis 2005. Déjà, l'industrie travaille collectivement à combler les lacunes technologiques dans ses propres sphères d'activité. L'association minière du Canada a lancé une initiative novatrice sur la durabilité et la gouvernance, *Towards Sustainable Mining*. La Canadian Association of Petroleum Producers a récemment créé un groupe progressif, le Canada Oil Sands Innovation Alliance. La *Directive 74* de l'Alberta a favorisé la coordination des stratégies de recherche sur l'assainissement des bassins de résidus. L'industrie devrait bientôt prendre de l'ampleur grâce à ces premiers succès et s'améliorer.

Le gouvernement du Canada appuie les partenariats entre l'industrie et les chercheurs par le truchement de 42 chaires de recherche industrielle et 155 chaires de recherche du Canada dans divers secteurs. De vastes plates-formes scientifiques et commerciales rendent le Canada attrayant pour les chercheurs et les investisseurs. Depuis les inventions sectorielles qui datent de plusieurs décennies telles que le kérosène, jusqu'aux moyens de transport alimentés au gaz naturel et le drainage par gravité au moyen de vapeur et en passant par la recherche en génomique et les infrastructures de financement bien établies^{17, 73, 84}, le Canada s'engage dans un avenir prêt pour les partenariats public-privé et les activités sur place rationalisées. Des organismes tels que le Pembina Institute et le Forum des politiques publiques du Canada appuient la recherche scientifique par des évaluations rigoureuses des politiques, donnant ainsi encore plus d'ampleur au rôle de chef de file que joue déjà le Canada dans le secteur. L'ensemble des ressources, des compétences et des réseaux crée un milieu propice à une collaboration concertée au Canada et à l'échelle internationale afin de diriger le monde dans un avenir d'innovation basé sur les technologies « omiques » pour une exploitation intensive de l'énergie et des ressources. La mise en œuvre d'une stratégie solide en génomique dans le secteur aidera le Canada et le monde à prévoir un avenir plus durable.

⁸³ Sommaire de *L'état de la science et de la technologie au Canada*. 2012. Conseil des académies canadiennes.

⁸⁴ L'industrie pétrochimique. L'encyclopédie canadienne. <http://www.thecanadianencyclopedia.com/articles/français/industrie-petrochimique>. Accès le 16 septembre 2012.

11. DÉFIS ET POSSIBILITÉS DU SECTEUR À CONSIDÉRER DANS LA STRATÉGIE

COMMUNICATION, ÉDUCATION ET FORMATION

Malgré des progrès importants dans des secteurs comparables, la génomique est encore largement considérée comme une science nouvelle dans le secteur de l'énergie et des mines. Les décideurs du domaine de l'extraction des hydrocarbures se sont surtout tournés vers les solutions techniques, puis les solutions chimiques et ce n'est que récemment qu'ils se sont intéressés à l'utilité potentielle des sciences « omiques ». L'industrie minière utilise la biotechnologie avec succès depuis des décennies, mais les progrès et l'intérêt à l'égard des nouvelles percées ont depuis stagné. L'industrie a fourni des échantillons en nombre considérable en vue d'évaluations métagénomiques dans le cadre de collaborations préliminaires. Les autres travaux s'orientent non pas vers l'identification des organismes présents dans des sites commerciaux, mais vers la définition de leur fonction et de leurs seuils de fonctionnement. Il reste encore beaucoup à faire, mais les entreprises du secteur fonctionnent à une échelle telle que même des améliorations minimales de l'extraction, de la transformation et du traitement des résidus représentent néanmoins des possibilités immenses si elles sont assorties d'une solide analyse de rentabilité. L'occasion de faire progresser la compréhension entre les participants du secteur et d'accroître la capacité technique de la recherche pour améliorer les activités sectorielles donne au Canada la possibilité d'exercer une profonde influence scientifique et commerciale dans ce nouveau secteur.

Faciliter les possibilités d'interdisciplinarité

La recherche fondamentale produit actuellement de grands volumes de données utiles que seuls des experts peuvent évaluer. Par conséquent, un aspect important des progrès futurs consistera à inclure la formation du

personnel de l'industrie, puis la participation d'experts scientifiques aux processus décisionnels. Les chercheurs doivent être informés des besoins et des possibilités de l'industrie et les données de la recherche fondamentale doivent être correctement interprétées pour que l'industrie les utilise. Ce n'est qu'à ce moment-là qu'il sera possible de passer convenablement des expériences en laboratoire aux applications pratiques. Des équipes intersectorielles de chercheurs et de représentants sectoriels devraient collaborer de manière transparente pour que les nouvelles technologies deviennent des applications, en s'employant à démystifier la perception du public à l'égard des applications génomiques et à apaiser ses préoccupations en ce qui a trait à l'environnement. Les organismes de réglementation doivent en outre évaluer plus en profondeur le potentiel de grande envergure des nouvelles technologies aux fins de la surveillance et de la conformité.

Désigner un champion sectoriel

L'atelier des parties prenantes a fait ressortir une proposition importante, à savoir qu'un « organisme ambassadeur » supervise les communications avec les chercheurs pour qu'ils connaissent bien les défis que doit relever le secteur. Des représentants du secteur de l'énergie et des mines ont recommandé qu'une association industrielle interdisciplinaire veille à un dialogue permanent, soit une association existante, soit un nouveau conseil constitué de membres de diverses associations et possédant des compétences diverses. L'union des forces dans le secteur permettrait de cibler les priorités parmi les enjeux communs de la recherche et d'élaborer une feuille de route pour que des solutions puissent être mises en œuvre, entre autres la gestion de la propriété intellectuelle. De plus, une association-cadre comme celle qui est proposée pourrait fournir des conseillers sectoriels pour l'examen

de projets, aider à déterminer les contributions du secteur à des projets de recherche axés sur la collaboration et faciliter la validation précommerciale de tout résultat découlant des projets. Les consortiums industriels ont un rôle important à jouer pour aider leurs partenaires des milieux universitaires à évaluer comment le rendement du capital investi est mesuré et orienter les partenariats de recherche pour qu'ils soient plus utiles à l'industrie. Les participants à l'atelier interdisciplinaire ont défini des priorités sectorielles à court et à long terme distinctes que l'association proposée devrait examiner, ce qui démontre que les domaines respectifs des mines et de l'énergie ne soient pas également prêts aux applications commerciales. Dans l'ensemble du secteur, chaque entreprise peut apprendre de l'autre par le dialogue et dans la pratique et une organisation-cadre générale pour coordonner et simplifier ces interactions est une étape naturelle vers une stratégie efficace. La Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC) a déjà entamé des pourparlers avec les représentants des centres de génomique concernant ce rôle de champion.

METTRE À PROFIT LES SYNERGIES AVANTAGEUSES

Pour accélérer la mise en œuvre de la stratégie, les participants à l'atelier ont également encouragé l'émulation des modèles de collaboration fructueux dans d'autres secteurs. Ces modèles comprennent plusieurs exemples canadiens et américains :

Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (CRIAQ)

Organisme sans but lucratif constitué de représentants de l'industrie et des milieux universitaires, le CRIAQ favorise et mène des recherches industrielles collaboratives et préconcurrentielles principalement dans les universités, avec l'aide du gouvernement du Québec et du CRSNG. Les principaux objectifs sont d'accroître la compétitivité de l'industrie aérospatiale et d'améliorer la base des connaissances collectives dans ce secteur grâce à une meilleure formation des étudiants.

Green Chemistry Canada

Financé par les gouvernements de l'Ontario et du Canada, Green Chemistry Canada utilise une chimie « intelligente » pour concevoir des produits et des procédés plus sûrs qui réduisent les résidus ou qui utilisent moins de ressources. Des innovations issues des milieux universitaires et de l'industrie se transforment en produits, en services et en entreprises écologiques novatrices qui améliorent la qualité de vie et préservent l'environnement. Des chercheurs et des entrepreneurs se voient offrir les compétences spécialisées et les ressources dont ils ont besoin pour que leurs technologies passent du laboratoire au marché : des collaborations industrielles; des compétences spécialisées concernant la mise au point de produits, les applications et les affaires; la gestion de la propriété intellectuelle et l'augmentation de la fabrication.

Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP)/ Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP)

Aux États-Unis, le SERDP et l'ESTCP sont des programmes de recherche environnementale du ministère de la Défense. Les dernières découvertes scientifiques et technologiques servent à améliorer la performance environnementale, à réduire les coûts et à maintenir les capacités. Les programmes répondent aux exigences courantes des technologies environnementales, favorisent le partenariat et la collaboration entre les universités, l'industrie, les services militaires et d'autres organismes fédéraux. Même si ces programmes sont indépendants, ils sont gérés à partir d'un bureau mixte pour s'assurer de l'entière coordination des efforts, depuis la recherche fondamentale et appliquée jusqu'à la démonstration et à la validation sur le terrain.

ÉLABORATION DE PROJETS PILOTES ET DE PROJETS DE DÉMONSTRATION

À court terme, la génomique peut aider à définir la diversité environnementale, à établir les données de base et à concevoir des indicateurs de surveillance des activités de l'industrie et de l'assainissement des sites. L'intégration des technologies « omiques » aux activités géochimiques actuelles accroîtra l'efficacité des applications futures. Tout comme pour le secteur de la santé, les résultats des laboratoires doivent être soumis à des essais pilotes dont les résultats peuvent ensuite servir à des essais sur le terrain; les environnements homogènes des laboratoires doivent être mis à l'essai dans le milieu opérationnel hétérogène. Les intervenants sectoriels pourraient envisager de partager les risques (et les coûts) des études pilotes, par exemple des démonstrations de validation de principe qui pourraient se faire rapidement sur le terrain.

Ingrédients essentiels

Des conseils très importants ont été donnés au sujet de la conception des essais pilotes et des projets de démonstration au cours de l'atelier de consultation :

- développer la capacité en infrastructures de recherche interdisciplinaire et en analyse des données;
- concevoir des projets pour obtenir des résultats mesurables d'ici deux ans, en se concentrant sur les rendements économiques;
- accroître les efforts de sensibilisation et de communication pour approfondir la compréhension et la collaboration entre les gestionnaires de l'industrie et les chercheurs en laboratoire;
- à mesure que les recherches se dérouleront et que les applications progresseront, il deviendra peut-être justifié d'inclure la participation de différents niveaux de l'industrie.

Différents niveaux d'application

À l'atelier, les représentants sectoriels ont recommandé que les progrès « omiques » viennent directement en aide à trois niveaux différents d'application : stades initiaux, court terme et long terme :

- **Applications aux stades initiaux.** Les technologies « omiques » sont déjà utilisées dans certaines applications aux stades initiaux pour produire des données de base et surveiller tout effet positif de l'assainissement ou tout effet négatif des activités de l'industrie. D'autres efforts aux stades initiaux devraient porter sur la nécessité constante d'acquérir des connaissances fondamentales qui pourront être intégrées aux activités physicochimiques actuelles pour obtenir des solutions biogéochimiques. Lorsque les données préliminaires auront aidé à définir et à caractériser l'activité biologique dans les exploitations minières et les sites d'hydrocarbures, il pourrait y avoir une démonstration claire du potentiel des applications « omiques » (p. ex., celles qui sont présentées ci-dessous). Par la suite, des essais pilotes de petite envergure pourront être menés. Les participants au récent atelier ont recommandé que la recherche fondamentale soit financée à même les fonds publics et que l'industrie fournisse des échantillons; les applications de biosurveillance pourraient déjà être mises à l'essai concurremment avec les méthodologies traditionnelles de surveillance. Le Programme des partenariats pour les applications de la génomique (PPAG), récemment lancé par Génome Canada, vise à stimuler ces partenariats public-privé. Pour accroître la collaboration entre les chercheurs et les « utilisateurs finaux » de la recherche, Génome Canada engage 30 millions de dollars dans ce programme afin de mobiliser des fonds additionnels de l'industrie, du gouvernement, des organismes sans but lucratif et autres pour créer des investissements de 90 millions de dollars en R-D.

- **Applications à court terme.** Après des essais pilotes, les applications « omiques » à court terme pourraient servir à faire avancer la surveillance, la biodétection, les efforts de récupération (p. ex., la biolixiviation sans sulfates), l'assainissement ou le traitement (p. ex., le traitement des résidus, l'optimisation des bioréacteurs et un meilleur traitement et une meilleure utilisation de l'eau). Les organismes de réglementation doivent participer à la détermination et à l'élaboration de solutions à court terme, étant donné qu'ils ont tout intérêt à ce que ces technologies soient adoptées dans la pratique; les sociétés minières et énergétiques n'ont généralement pas été enclines à adopter rapidement la nouvelle technologie, à moins qu'elle ne soit assortie d'une solide analyse de rentabilité. L'adoption des applications « omiques » dans l'industrie nécessitera de bons arguments financiers et des communications intersectorielles pour combler les lacunes dans les connaissances et surmonter les idées préconçues. Les chercheurs comme l'industrie devront se concentrer sur des résultats rentables pour que les interactions interdisciplinaires en valent la peine; chacun devra se rapprocher de l'autre pour en venir à une compréhension commune du potentiel des technologies « omiques » d'améliorer le secteur.
- **Applications à long terme.** L'application pleine et entière des technologies « omiques » peut faire progresser les activités actuelles, renouveler des perspectives mises de côté précédemment ou produire des procédés commerciaux entièrement nouveaux. Dans chaque cas, toute restriction biologique devra avoir été corrigée pour qu'une application sur place soit possible, par exemple le pH, la température, la toxicité de l'environnement, la tolérance des métaux, la résistance à l'abrasion, le contrôle et le confinement. Les projets industriels mixtes peuvent servir à examiner plus en détail le potentiel d'application pour un rendement sur le capital investi maximal, offrant ainsi un moyen aux partenaires de répartir les coûts d'élaboration d'une solution à une perspective ou à un problème commun.

12. RÉSUMÉ

Le secteur canadien de l'énergie et des mines a une occasion idéale d'améliorer son efficacité opérationnelle et son rendement environnemental en adoptant activement les nouvelles applications « omiques ». Impensable il y a plus d'une dizaine d'années, il est maintenant possible de produire de manière économique un profil complet des communautés biologiques à l'œuvre dans les milieux industriels, ce qui permet de mieux comprendre « quels organismes s'y trouvent, ce qu'ils font et comment leur action peut nous servir ».

Le Canada a montré la voie par un processus de consultation approfondi des parties prenantes auquel ont participé l'industrie, les chercheurs, le gouvernement, les organismes de réglementation et les Autochtones pour évaluer le rôle vital des sciences « omiques » dans l'amélioration des activités dans le secteur de l'énergie et des mines. L'importance de ce secteur à l'échelle nationale et internationale et l'ampleur des difficultés opérationnelles et environnementales à résoudre fait de ce rôle une occasion économique urgente. La présente stratégie sectorielle montre que les applications

« omiques » ont déjà produit des résultats importants et que l'industrie est en bonne position pour en examiner plus en profondeur les résultats en temps opportun. Une collaboration intersectorielle accrue sera essentielle à la réalisation du plein potentiel des applications « omiques ». La présente stratégie est un point de départ important pour la détermination de ses défenseurs qui entretiendront le dialogue entre les diverses disciplines et détermineront les pratiques exemplaires qui créeront la synergie dans le secteur. Mise en œuvre efficacement, cette stratégie aidera le secteur à comprendre pleinement les avantages qu'offrent les technologies « omiques » pour résoudre certains des problèmes communs les plus urgents et saisir les possibilités exceptionnelles qu'elles offrent.

ANNEXE :

PARTICIPANTS À L'ATELIER DES PARTIES PRENANTES

NOM DE FAMILLE	PRÉNOM	TITRE	SOCIÉTÉ
Adamson	Richard	Directeur général	Carbon Management Canada
Alvarado	Oscar	Analyste des recherches et des projets	BacTech Environmental
Atlas	Ron	Professeur	Université de Louisville
Bailey	David	Président et chef de la direction	Génome Alberta
Baird	Donald	Chercheur scientifique	Environnement Canada
Baldwin	Sue	Professeure agrégée	Université de la Colombie-Britannique
Bell	Cindy	V.-p. exécutive, Développement corporatif	Génome Canada
Bolton	Alexander	Membre du conseil	Energy Resources Conservation Board
Budwill	Karen	Chercheuse scientifique	Alberta Innovates – Technology Futures
Burns	Kyeema	Consultante	AGE Consulting
Caffrey	Sean	Gestionnaire de projet	Génome Alberta
Chapman	Peter	Chercheur principal en environnement	Golder Associates Ltd
Cheel	Daphne	Directrice administrative	Gouvernement de l'Alberta
Clarke	Teresa	Directrice, Programmes de recherche	OGI – Preneuse de notes
Cook	Eric	PDG/directeur administratif	Conseil de la recherche et de la productivité
Cunningham	Lesley	Conseillère stratégique principale	Ministère du Développement économique et de l'Innovation
Dambrowitz	Chris	Directeur – Initiatives bio-industrielles stratégiques	Biorefining Conversions Ntwk – Université de l'Alberta
Dempsey	Stephen	Directeur administratif	Offshore Energy Research Association of Nova Scotia
Deuchars	Kathryn	Gestionnaire principale, Expansion des affaires et recherche	OGI – Preneuse de notes
Doerksen	Kari	Gestionnaire de projet	Génome Prairies
Edwards	Julian	Directeur, Génie des procédés opérationnels	Vale
Fisher	John	Gestionnaire de la mise en œuvre mondiale des technologies	DuPont Canada
Foght	Julia	Professeure	Université de l'Alberta
Haack	Elizabeth	Chercheuse fonctionnelle en environnement	WorleyParsons
Habib	Magdi	Directeur général, CanmetMINES	Ressources naturelles Canada
Hajibabaei	Mehrdad	Professeur	Université de Guelph
Hall	Jeremy	Professeur	Université Simon Fraser
Hanton	Dhugal	Conseiller, Récupération et assainissement	Cenovus Energy
Head	Ian	Professeur de microbiologie environnementale	Université de Newcastle
Hubert	Casey	Conférencier en géomicrobiologie	Université de Newcastle
Hymers	Lesley	Spécialiste en environnement et en éducation	Ontario Mining Association
Janes	Glenn	Chef de la direction	Research and Development Corporation of Newfoundland and Labrador

NOM DE FAMILLE	PRÉNOM	TITRE	SOCIÉTÉ
Jenneman	Gary	Chercheur principal	ConocoPhillips
Johnson	Matt	Gestionnaire, Expansion des affaires	Ontario Centres of Excellence
Kalmar	Gabe	Vice-président, Développement sectoriel	Génome Colombie-Britannique
King	Ian	Post-doctorat – Biosurveillance	Université de Guelph
Krug	Thomas	Directeur	Geosyntec Consultants
Larter	Stephen	Professeur, Chaire de recherche du Canada en géologie pétrolière	Université de Calgary
Lawrence	Rick	Président	Lawrence Consulting Ltd
LePage	Marc	Président et chef de la direction	Génome Québec
Livingstone	Angus	Directeur général	UILO, UBC
Ma	Kesen	Professeur agrégé	Université de Waterloo
Mahadevan	Radhakrishnan	Professeur agrégé	Université de Toronto
Mattes	Al	Spécialiste de la biorestauration	Nature Works
McBeth	Joyce	Scientifique – Exploitation minière écologique	Canadian Light Source Inc.
McCauley	Edward	Vice-président (Recherche)	Université de Calgary
Morin	Karine	Directrice, GE ³ LS	Génome Canada
Ogaranko	Tom	Modérateur	Centres de génomique
Penner	Tara	Microbiologiste environnementale	Syncrude, Canada, Ltd
Petropoulos	Helen	Gestionnaire principale, Expansion des affaires, preneuse de notes	Institut de génomique de l'Ontario
Platts	Nick	Chimiste et conseiller scientifique spécialiste en environnement	Nelson Environmental Remediation Ltd.
Pontarollo	Reno	Dirigeant scientifique principal	Génome Prairies
Porter	Dave	Chef de la direction	BC First Nations Energy and Mining Council
Riley	Kim	Gestionnaire, Diffusion externe	OGI
Seto	Harvey	Directeur, Rôle de chef de file en environnement	Cameco Corporation
Spear	Mike	Directeur, Communications du Centre de génomique	Génome Alberta
Stephens	Andrew	Directeur	Génome Alberta
Stone	Andy	Agent de promotion commerciale	Génome Atlantique
Suflita	Joseph	Professeur	Université de l'Oklahoma
Swan	Kate	Codirectrice, Programmes de génomique	Génome Canada
Symington	Alison	V.-p., Expansion de l'Institut	OGI
Takacs-Cox	Aniko	Gestionnaire, Mise en valeur du secteur	Génome Colombie-Britannique
Tannenbaum	Rhonda	V.-p., Expansion de l'Institut	OGI – Preneuse de notes
van Rooijen	Gijs	Dirigeant scientifique en chef	Génome Alberta
Voordouw	Gerrit	Professeur	Université de Calgary
Warren	Lesley	Professeur	Université McMaster
Willems	Paul	Vice-président, Technologie	BP
Wunch	Kenneth	Microbiologiste à la production	BP Exploration
Zou	Feng	Consultant principal	Vale Canada Limited

RENSEIGNEMENTS ADDITIONNELS

Génome Canada

Cindy Bell
Vice-présidente exécutive, Développement corporatif
Tél. : 613-751-4460, poste 218
cbell@genomecanada.ca
www.genomecanada.ca

Génome Colombie-Britannique

Gabe Kalmar
Vice-président, Développement sectoriel
Tél. : 604-637-4374
gkalmar@genomebc.ca
www.genomebc.ca

Génome Alberta

Gijs van Rooijen
Conseiller scientifique en chef
Tél. : 403-210-5253
vanrooijen@genomealberta.ca
www.genomealberta.ca

Génome Prairies

Chris Barker
Conseiller scientifique en chef
Tél. : 306-668-3587
cbarker@genomeprairie.ca
www.genomeprairie.ca

Institut de génomique de l'Ontario

Alison Symington
Vice-présidente, Développement corporatif
416-673-6594
asymington@ontariogenomics.ca
www.ontariogenomics.ca

Génome Québec

Catalina López-Correa
Vice-présidente, Affaires scientifiques
Tél. : 514-398-0668
clopez@genomequebec.com
www.genomequebec.com

Génome Atlantique

Shelley King
Vice-présidente, Recherche
et Développement des affaires
Tél. : 902-421-5646
sking@genomeatlantic.ca
www.genomeatlantic.ca

