

Projet :
[UOSE 034 et Compréhension du
traitement des résidus des sables
bitumineux aux échelles nano, micro et
macro, avec réutilisation et recyclage
accrus de l'eau]

Volet de recherche et développement de l'initiative écoÉNERGIE sur l'innovation

Rapport public final

Table des matières

1	Quelle était la lacune en matière de R-D et pourquoi ce projet était-il nécessaire?	1
2	Objectif du projet.....	1
3	Évolution du projet	2
3.1	Détermination et recherche de partenaires, de permis, etc.	2
3.2	Activités de R-D réalisées.....	2
3.3	Problèmes rencontrés.....	8
4	Conclusions	9
4.1	Les avantages et les résultats du projet.....	10
4.2	Quelles sont les prochaines étapes à adopter en recherche et développement dans ce domaine?	13

1 Quelle était la lacune en matière de R-D et pourquoi ce projet était-il nécessaire?

Le Canada possède de vastes ressources naturelles ainsi que les gisements de sables bitumineux les plus grands au monde. Dans un procédé d'extraction à l'eau de sables bitumineux, la production d'un baril de bitume nécessite environ de deux à quatre barils d'eau. Malheureusement, après la récupération du bitume, des quantités considérables de boues de résidus sont abandonnées sur le terrain et doivent être déversées dans des bassins de stockage des résidus. Après leur dépôt, les particules grossières présentes dans les résidus vont sédimenter pour former des plages alors que les fines particules des matières solides se sédimentent et se consolident très difficilement. Après des jours, des semaines, des mois, voire quelques années de sédimentation, les matières solides fines restent en suspension sous forme de résidus fins mûrs (RFM). Bien qu'une partie de l'eau présente dans les résidus originaux pourrait être libérée à l'étape initiale de la sédimentation, aucune densification observable des résidus fins mûrs ne pourrait avoir lieu durant plusieurs décennies. Il s'agit de l'une des grandes difficultés techniques et environnementales auxquelles l'industrie est confrontée de nos jours, à savoir comment faire sédimenter et consolider les résidus, remettre en état les terres affectées, et recycler et réutiliser davantage l'eau piégée dans les résidus pour le traitement des sables bitumineux. Bien que des efforts considérables aient été consacrés à l'élaboration de solutions pour la gestion des résidus des sables bitumineux, il n'existe aucune technologie commerciale qui peut résoudre les problèmes que posent les résidus fins mûrs de manière économique et définitive.

Ce projet est axé sur l'élaboration de nouveaux polymères écologiques et de faible coût capables d'accroître efficacement le taux de sédimentation des particules solides fines. Ces nouveaux polymères ont été intégrés à un procédé de floculation par coacervation nouvellement conçu au moyen duquel on peut obtenir de l'eau plus clarifiée aux fins du recyclage dans l'extraction des sables bitumineux. Le taux de sédimentation des résidus des sables bitumineux, en particulier des résidus issus de l'extraction, est considérablement augmenté en utilisant les polymères élaborés dans le cadre de ce projet, et la qualité de l'eau recyclée est sensiblement meilleure. Entre-temps, un nouveau procédé d'assèchement a été mis au point, fondé sur le procédé de floculation inspiré du phragmatopoma californica et suivi d'une compression à deux étapes. Ce procédé permet de récupérer la quasi-totalité de l'eau des résidus fins mûrs afin de la réutiliser pour la production des sables bitumineux et de traiter les résidus fins mûrs d'une grande robustesse mécanique, ce qui répondrait aux exigences du gouvernement de l'Alberta sur les résidus des sables bitumineux. Le projet s'inscrit dans les objectifs de l'initiative écoÉNERGIE sur l'innovation, soit d'effectuer des travaux de recherche et développement afin d'améliorer la gestion des résidus en réduisant les stocks de résidus et le volume des résidus produits.

2 Objectif du projet

L'objectif de ce projet consiste à mieux comprendre les mécanismes d'interaction de base entre les particules d'argile, l'eau et le bitume dans les résidus des sables bitumineux aux échelles nano, micro et macro, et à élaborer des flocculants polymères très efficaces, économiques et écologiques basés sur des

macromolécules naturelles (c.-à-d., un dérivé de polysaccharide naturel et des polymères biomimétiques inspirés par les systèmes bio-adhésifs marins tels que les moules). Les flocculants polymères sont des substances chimiques qui provoquent l'agrégation des particules en suspension (les particules agrégées sont appelées floccs) qui deviennent plus grosses et plus lourdes. Les floccs formés à partir des particules fines pourraient augmenter considérablement le taux de sédimentation des résidus fins et permettraient qu'une plus grande quantité d'eau soit libérée à des fins de recyclage. La recherche porte sur le traitement des résidus des sables bitumineux, associe les initiatives de gestion de l'eau et contribue à la mise en valeur continue et durable des sables bitumineux et d'autres ressources minérales au Canada.

3 Évolution du projet

3.1 Détermination et recherche de partenaires, de permis, etc.

Il est possible de déterminer un certain nombre d'intervenants pour la gestion des résidus, y compris la réutilisation et le recyclage de l'eau du secteur des sables bitumineux :

- a) les sociétés pétrolières et gazières qui participent à la production et à l'extraction du bitume des sables bitumineux;
- b) les collectivités locales et autochtones;
- c) les organismes environnementaux non gouvernementaux;
- d) les gouvernements (tous les paliers).

Tous ces intervenants tireraient profit de la création de nouveaux polymères très efficaces, peu coûteux et écologiques pour l'amélioration de la réhabilitation des bassins de résidus et du traitement de l'eau. Les grandes sociétés minières (sables bitumineux, métaux de base et charbon) pourraient également être les bénéficiaires éventuels des résultats puisque ceux-ci pourraient améliorer la gestion de leurs résidus miniers et la récupération et le recyclage de l'eau issue de leurs activités d'extraction et de traitement. En outre, en soutenant le développement durable de l'industrie des sables bitumineux, les collectivités locales, y compris les groupes autochtones, bénéficieraient des possibilités d'emploi et des débouchés commerciaux. Tous les paliers gouvernementaux retireraient des bénéfices de l'accroissement de la mise en valeur et de la production des sables bitumineux qui seraient accompagnés d'investissements en capital et de création d'emplois.

3.2 Activités de R-D réalisées

De multiples méthodes ont été utilisées pour caractériser de façon détaillée la composition chimique de l'eau et des matières solides présentes dans les échantillons de résidus des sables bitumineux fournis par le secteur des sables bitumineux. Les résultats obtenus nous ont orientés vers la conception et la synthèse de flocculants polymères efficaces, économiques et écologiques basés sur des macromolécules naturelles (c.-à-d., un dérivé du chitosane et les polymères biomimétiques inspirés par les systèmes bio-adhésifs marins tels que les moules) et accompagnés d'interactions adhésives spéciales avec les

particules d'argile, l'eau et le bitume présents dans les résidus des sables bitumineux. Les flocculants polymères ainsi conçus ont été adoptés pour le traitement des résidus des sables bitumineux, y compris les résidus issus de l'extraction, les résidus mélangés provenant des résidus issus de l'extraction ainsi que les résidus fins mûrs dilués et les résidus fins mûrs originaux, mettant en évidence le rendement unique de la floculation en ce qui a trait à la qualité de l'eau et la vitesse de sédimentation. Un nouveau procédé fondé sur la floculation inspirée du phragmatopoma californica suivie d'une compression à deux étapes a été élaboré en association avec certaines technologies de consolidation commerciales des secteurs des sables bitumineux. Ce procédé nous permet de récupérer la quasi-totalité de l'eau contenue dans les résidus fins mûrs pour sa réutilisation dans la production des sables bitumineux et le traitement des résidus fins mûrs d'une grande robustesse mécanique, ce qui satisferait à l'exigence du gouvernement de l'Alberta sur les résidus des sables bitumineux. Le procédé de floculation par coacervation inspirée du phragmatopoma californica ainsi élaboré pourrait être intégré dans plusieurs procédés de résidus commerciaux (présentés en ligne), tels que le procédé de réduction des résidus (PRR) de Suncor Energy et le procédé de floculation-centrifugation de Syncrude Canada Ltd. Les activités en matière de recherche et développement effectuées tout au long du projet peuvent être regroupées en trois parties : (1) élaboration de méthodes appropriées pour caractériser la composition chimique complexe de l'eau présente dans les résidus des sables bitumineux et les mécanismes d'interaction de base entre les particules d'argile, l'eau et le bitume dans les résidus des sables bitumineux et les flocculants polymères; (2) conception et synthèse de nouveaux flocculants polymères bio-inspirés et leur incorporation dans le procédé de floculation par coacervation nouvellement mis au point pour le traitement de différents résidus des sables bitumineux; (3) élaboration d'un nouveau procédé d'assèchement au moyen conjointement d'une floculation par coacervation inspirée du phragmatopoma et suivie d'une compression à deux étapes pour assécher et consolider efficacement les résidus fins mûrs purs.

Mise au point de méthodes exhaustives pour caractériser les mécanismes d'interaction de base entre les particules d'argile, l'eau et le bitume présents dans les résidus des sables bitumineux et les flocculants polymères : Afin d'optimiser et de réussir la conception et la synthèse des flocculants polymères fonctionnels et d'en améliorer le rendement en matière de floculation sur les résidus des sables bitumineux y compris les résidus issus de l'extraction et les résidus fins mûrs, les mécanismes d'interaction de base entre les particules d'argile, l'eau et le bitume présents dans les résidus des sables bitumineux et les flocculants polymères ont fait l'objet d'une étude à l'aide d'un appareil de forces de surface (AFS), une microbalance à cristal de quartz avec surveillance de la dissipation (MCQ-D) et la mesure de la réflectance d'un faisceau focalisé (MRFF) respectivement aux échelles nano, micro et macro. Les résultats ont révélé qu'un seul flocculant polymère ne peut réussir généralement à traiter efficacement les résidus fins mûrs puisque la composition chimique compliquée de l'eau et les interfaces complexes nuisent considérablement aux interactions adhésives entre le flocculant polymère et les particules de résidus, de sorte que la floculation est insuffisante, en particulier quand les flocculants polymères adoptés sont des polyélectrolytes (c.-à-d. des polymères chargés).

De nouveaux procédés de floculation utilisant deux flocculants ou adjuvants complémentaires ont été élaborés et validés pour le traitement des résidus issus de l'extraction, des résidus mélangés issus de

l'extraction et des résidus fins mûrs ou des résidus fins mûrs dilués : Inspirés des organismes marins tels que les moules et les phragmatopoma californica, nous avons mis au point un nouveau procédé de floculation en utilisant deux flocculants ou adjuvants complémentaires. En utilisant deux polyélectrolytes chargés de manière opposée comme flocculants polymères ainsi que l'interaction électrostatique et la composition chimique du catéchol, la méthode a été validée comme stratégie de floculation efficace pour la sédimentation des résidus issus de l'extraction, des résidus mélangés provenant des résidus issus de l'extraction et des résidus fins mûrs et des résidus fins mûrs dilués, ainsi que pour le recyclage de l'eau présente dans ces résidus. Comme l'illustre la Figure 1, le procédé de floculation mis au point sur les résidus issus de l'extraction a permis d'obtenir un meilleur rendement de la floculation en ce qui a trait au TSI et à la turbidité de l'eau libérée par comparaison avec le procédé de floculation généralement adopté avec un flocculant polymère commercial, le magnafloc 1011 (MF). On obtient un taux de sédimentation comparable à celui du magnafloc seul lorsqu'on utilise des doses optimales de magnafloc et de chitosane. Par conséquent, la limpidité du liquide surnageant est fortement améliorée : la turbidité du liquide surnageant qui en résulte est extrêmement faible et sa valeur de turbidité quotidienne moyenne (NTU) est de 71 NTU alors que la valeur du TSI a été maintenue à une valeur aussi élevée que 7,7 m/h. Le procédé complet de la floculation à deux étapes a également été étudié en utilisant la MRFF et il a été découvert que le rendement amélioré de la sédimentation du procédé mis au point de floculation à deux étapes est attribuable à la déstabilisation séquentielle : (1) rapprochement des fines particules solides par le polymère polyacrylamide anionique (c.-à-d., le magnafloc) et (2) autre agrégation et floculation induites par la neutralisation de la charge du polymère cationique (c.-à-d., le chitosane).

Bien que le procédé de floculation à deux étapes donne de bons résultats en ce qui a trait au traitement des résidus issus de l'extraction, des résidus mélangés provenant des résidus issus de l'extraction et des résidus fins mûrs pour ce qui est du taux initial de la sédimentation (TIS) et de la limpidité de l'eau libérée, son rendement est relativement limité en ce qui a trait à la consolidation des résidus fins mûrs dilués même à la suite d'activités supplémentaires telles que la filtration. Afin de permettre à ce procédé de coacervation de traiter les résidus fins mûrs dilués, nous avons conçu et créé un flocculant polymère écologique basé sur un polysaccharide naturel, le chitosane, qui présente une sensibilité à la température et qui adopte une architecture polymère en goupillon. Le polysaccharide thermosensible ainsi créé, le poly(2-(2- méthoxyéthoxy) méthacrylate d'éthyle), le chitosane greffé (CgM), pourrait passé d'hydrophile à hydrophobe en augmentant la température au-dessus de la température de séparation de phase critique inférieure, soit autour de 27 °C. Nous avons mis en évidence que dans le procédé de floculation par coacervation, le rendement de la floculation de ce flocculant polymère ainsi que les flocculants polymères anioniques était excellent pour traiter les résidus issus de l'extraction, les résidus mélangés provenant des résidus issus de l'extraction et des résidus fins mûrs ainsi que les résidus fins mûrs dilués. À l'aide du traitement thermique, la déstabilisation séquentielle exécutée sur les fines particules solides restantes présentes dans le liquide surnageant pourrait être réduite et améliorer la limpidité de l'eau libérée, ce qui pourrait être obtenu par une plus forte transmission des liquides surnageant à 50 °C comparativement à celle à 4 °C (Figure 2). Malgré un meilleur rendement de la floculation sur les résidus fins mûrs dilués en ayant recours au procédé de floculation à deux étapes ainsi qu'au polymère thermosensible cationique mis au point (voir la Figure 2), le CgM, la consolidation

sur les résidus fins mûrs était très limitée. Afin de dessécher et de consolider davantage les résidus floculés, la filtration a été appliquée à ces résidus et on a observé que le polymère CgM améliorait la filtrabilité du gâteau de résidus floculés après qu'il ait été traité avec un dosage optimal de polymères de CgM et de MF, soit 0,83 g/L de CgM suivi de 0,2 g/L de MF par comparaison à celui qui a été traité avec 0,2 g/L de MF (voir la figure 2D). En outre, le traitement des résidus fins mûrs dilués à une température supérieure à la LCST, par exemple, 50 °C assure un taux de filtration plus rapide par comparaison à celui de 4 °C. L'utilisation d'un traitement thermique et d'une filtration adéquates nous a permis de dessécher davantage les résidus fins mûrs floculés et de consolider les résidus en une forme physique pour dépôt direct avec une teneur en matière solide >60 %.

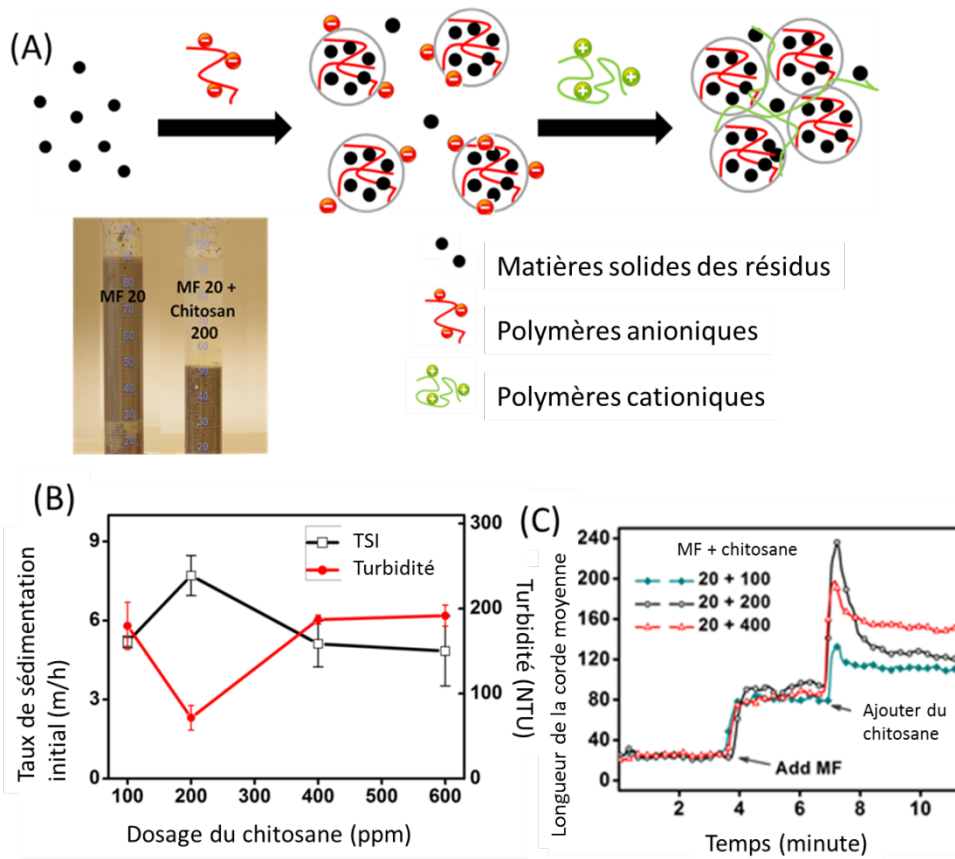


Figure 1: Rendement de la floculation et mécanisme connexe du procédé de floculation exécuté sur les résidus issus de l'extraction exemptés avec deux floculants polymères ayant une charge opposée : (A) Un schéma illustre le mécanisme de floculation proposé faisant partie du procédé de floculation à deux étapes. Le médaillon est une image présentant une amélioration considérable de la limpidité de l'eau libérée après l'exécution du procédé de floculation à deux étapes en utilisant 20 ppm de MF suivie de 400 ppm de chitosane par comparaison à celle qui a été traitée avec un dosage optimal de MF, qui est un floculant généralement adopté dans le secteur des sables bitumineux. (B) TSI et turbidité des liquides surnageants présents dans les résidus issus de l'extraction des sables bitumineux sédimentés en utilisant un procédé de floculation à deux étapes avec 20 ppm de MF, suivis de différents dosages de chitosane. (C) Longueur de corde moyenne au carré pondéré par rapport au temps mesuré à l'aide de la MRFF dans la floculation à deux étapes en utilisant un dosage fixe de MF de 20 ppm avec un dosage de chitosane varié (100, 200 et 400 ppm) pour le traitement des résidus des sables bitumineux. La vitesse de malaxage avait été fixée à 300 t/min.

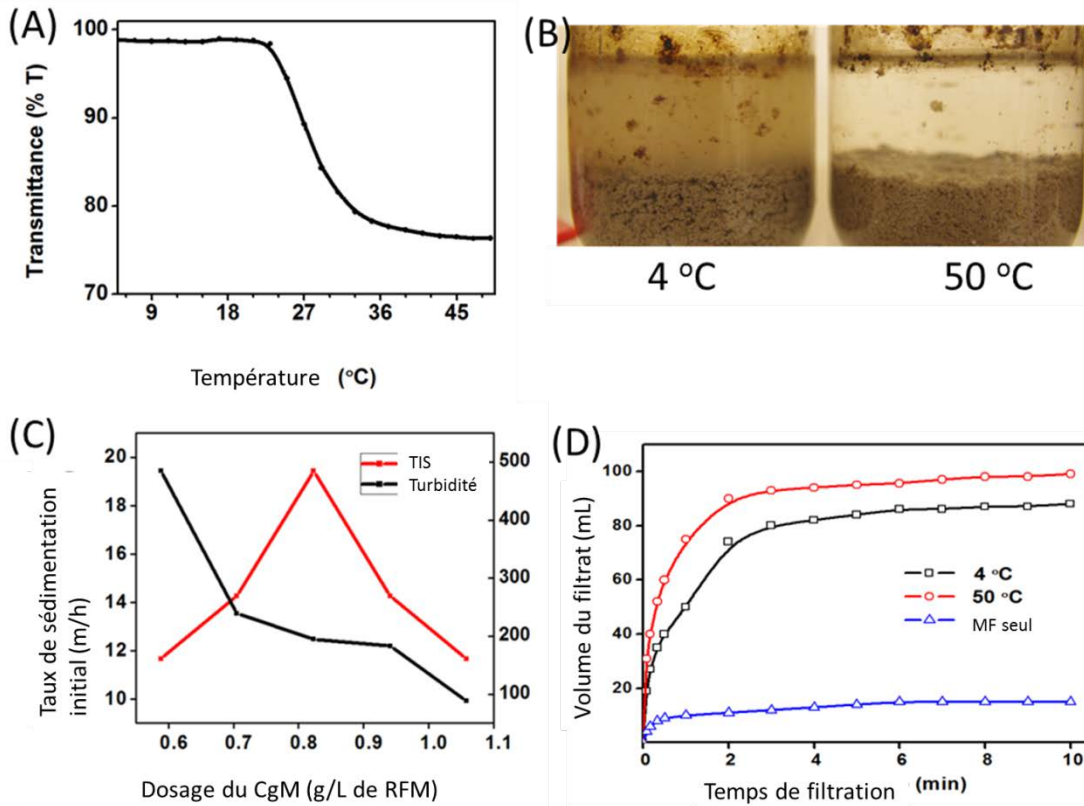


Figure 2: Les propriétés du flocculant polysaccharide thermosensible créé et son rendement en matière de floculation sur les résidus fins mûrs dilués en utilisant le procédé de floculation à deux étapes mis au point : (A) Détermination de la température de solution critique inférieure (LCST) pour le polysaccharide thermosensible élaboré, le poly(2-(2-méthoxyéthoxy) d'éthyle) le chitosane greffé (CgM), dans une solution aqueuse (10 mg/mL), basée sur le changement dans la transmittance (à 700 nm) des solutions aqueuses par rapport au changement de la température. (B) Effet de la température sur la limpidité finale du liquide surnageant libéré à la suite de la floculation avec le MF et le CgM, ce qui met clairement en évidence qu'en augmentant la température à 50 °C (supérieure à la LCST), la limpidité du liquide surnageant libéré peut être considérablement améliorée. (C) Taux de sédimentation initial (TSI) et turbidité des liquides surnageants présents dans les résidus des sables bitumineux déposés, issus de l'extraction, en utilisant un procédé de floculation à deux étapes avec 20 ppm de MF suivi de différents dosages du CgM. (D) Filtrabilité des gâteaux floculés (c.-à-d., le volume de l'eau filtrée en fonction du temps) après avoir été traités avec 0,83 g/L de CgM suivi de 0,2 g/L de MF à 4 °C et à 50 °C ainsi que 0,2 g/L de MF seul à la température de la pièce.

Un nouveau procédé associant une floculation par coacervation inspirée du phragmatopoma californica suivie d'une compression à deux étapes a été mis au point pour l'assèchement et la consolidation des résidus fins mûrs : il importe de noter que la capacité des flocculants polymères créés à traiter les résidus fins mûrs non dilués est limitée. Par conséquent, une autre stratégie de floculation fondée sur un procédé de coacervation autoréparable a été élaborée en conférant aux flocculants polymères et aux adjuvants les capacités de former des liaisons de base de Schiff dynamiques et d'adhérer aux particules de résidus même dans des résidus fins mûrs non dilués. Deux composantes polymères adhésives ont été créées et synthétisées afin de remplacer les polyélectrolytes, chargés de manière opposée, utilisés dans le procédé de coacervation antérieurement mis au point, dont une est un polymère cationique ayant

une architecture hyperramifiée, la polyéthylèneimine (PEI) ramifiée, une polybase faible et non sensible à la force ionique, et l'autre est un agent de réticulation fonctionnelle de conception délicate. Ce procédé de floculation pourrait considérablement améliorer la propriété mécanique des résidus fins mûrs floculés et récupérer l'eau d'entrée contenue dans les résidus fins mûrs, ce qui a été validé en les mesurant avec un rhéomètre et en mesurant le temps de la succion capillaire. Afin de faciliter le recyclage de l'eau d'entrée contenue dans les résidus fins mûrs et d'assécher et de consolider les résidus fins mûrs floculés pour dépôt direct, un procédé de consolidation à deux étapes a été mis au point sur les résidus fins mûrs floculés en appliquant successivement deux pressions différentes, c.-à-d., une basse pression (p. ex., 0,15 bar) et une haute pression (10 bars). L'illustration de la consolidation sur la Figure 3(A) a été obtenue à l'aide d'un appareil construit à l'interne composé de deux plaques en acier et d'une pince à vis. Les conditions de pression adoptée ici sont relativement faibles et peuvent être facilement atteintes dans le traitement industriel réel des résidus. Après avoir traité 120 g de résidus fins mûrs avec 0,5 g de PEI et 0,5 g d'agent d'oxyde de polyéthylène difonctionnel (DFPEO), nous avons facilement récupéré 30 % en poids de l'eau d'entrée présente dans les résidus fins mûrs. Après avoir poursuivi de façon séquentielle l'application d'une pression de 0,15 bar (<1 h) et de 10 bars (<1 h), un total de 70 % en poids d'eau a été libéré. Ce qui est plus important, la teneur en matières solides dans les résidus fins mûrs comprimés pourraient être augmentée considérablement et passer de 30 % en poids à environ 75 % en poids, et ceux-ci pourraient être directement déposés pour la remise en état des terres. Les figures 3(B) et 3(C) présentent des gâteaux compressés de résidus fins mûrs après traitement avec de la PEI et du DFPEO, suivi respectivement par l'application d'une pression de 0,15 bar (<1 h) et de 10 bars (1 h). Il importe de noter que le gâteau compressé de résidus fins mûrs semble être passablement sec même seulement après l'application d'une pression de 0,5 bar pendant 0,5 h et sa résistance mécanique est élevée. Ce gâteau pourrait être consolidé davantage pour former un sol à teneur en matières solides supérieure à 70 % en poids avec une pression de 10 bars (<1 h). Ces essais de compression ont permis de réduire de cinq fois le volume du gâteau. Afin d'étudier le mécanisme du procédé mis au point et les rendements excellents sur l'assèchement et la consolidation des résidus fins mûrs, un appareil de forces de surface (AFS) a été utilisé pour examiner les interactions entre ces polymères synthétisés et les particules solides des résidus. Les mesures de l'AFS indiquent clairement que la PEI pourrait adhérer fortement aux particules d'argile pour provoquer des agrégations primaires qui pourraient former des ponts avec les liaisons de base de Schiff entre la PEI et le DFPEO. Ces ponts avec les liaisons de base de Schiff sont hautement réversibles. S'il est soumis à une force ou à une pression externe telle que le cisaillement, le pont peut être facilement endommagé, mais il pourrait être complètement récupéré. Par conséquent, les résultats ont tous confirmé que le procédé mis au point associé à une floculation par coacervation inspirée par le phragmatopoma californica et suivie par une compression à deux étapes constitue une méthode prometteuse pour la consolidation des résidus fins mûrs et pourrait être intégré à des technologies existantes pour les résidus des sables bitumineux.

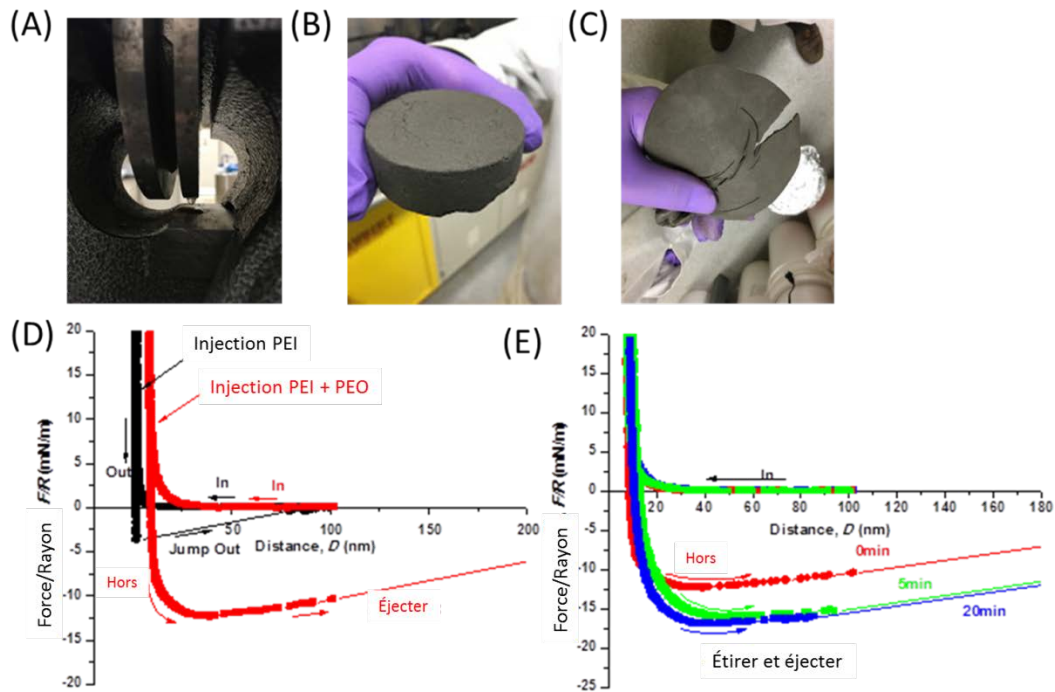


Figure 3: Propriétés de la consolidation du nouveau procédé mis au point comprenant une floculation par coacervation inspirée du phragmatopoma californica, suivie d'une compression à deux étapes sur les résidus fins mûrs accompagnée de la polyéthylèneimine (PEI) ramifiée et oxyde de polyéthylène difonctionnel (DFPEO) ainsi que les mesures de la force de surface afin d'étudier le mécanisme de consolidation connexe en utilisant l'AFS : (A) L'installation effectuée en interne en utilisant une pince à vis consolide les résidus fins mûrs floculés. En raison de la forte cohésion et de la grande résistance mécanique des gâteaux de résidus fins mûrs floculés, ceux-ci demeurent complets et poursuivent leur assèchement sous une pression externe. Les figures (B) et (C) présentent les gâteaux consolidés pressés après l'application d'une pression de 0,15 bar pendant 0,5 h et de 10 bars pendant 1 h. Les résultats de l'AFS illustrant les interactions entre le mica (argile à modeler), la PEI et le DFPEO, et la réversibilité de l'intensité de la force des liaisons de base de Schiff formées entre les groupes d'amine et de benzyladéhyde de la PEI ramifiée et du DFPEO : (D) les profils force-distance entre deux surfaces de mica associés à l'approche et à la séparation après l'injection de la PEI (la ligne noire) suivie de l'injection du DFPEO (la ligne rouge) (E) les profils force-distance des deux surfaces de mica associés à l'approche et à la séparation après l'injection de la PEI et du DFPEO.

3.3 Problèmes rencontrés

Les sociétés industrielles et les universités ont déployé des efforts considérables pour la mise au point de différentes technologies afin de résoudre les difficiles problèmes liés aux résidus fins mûrs afin de recycler de façon efficiente et efficace de grandes quantités d'eau d'entrée et de remettre en état les terres occupées par d'énormes bassins à résidus, y compris la technologie des résidus composites (TC), la technologie des résidus épais (RE), l'opération de réduction des résidus (ORR) et le procédé de floculation et centrifugation. Cependant, aucune de celles-ci ne parvient à assécher efficacement et directement les résidus fins mûrs. Pour améliorer le rendement de l'assèchement, les méthodes existantes requièrent généralement l'exécution d'étapes de prétraitement supplémentaires telles que la dilution ou l'ajout de sables grossiers. D'autres méthodes telles que le traitement par cycles gel-dégel ont fait la démonstration de leur efficacité dans l'assèchement des résidus fins mûrs à petite échelle.

Cependant, la mise à l'échelle de cette méthode (traitement par cycles) pourrait être difficile et son rendement final dépend largement des conditions météorologiques et des variations saisonnières. Il importe de noter que les technologies existantes sont toutes fortement tributaires des conditions du procédé telles que les façons d'ajouter et de mélanger les produits chimiques dans les résidus fins mûrs et les conditions de séchage naturel par évaporation.

En raison de la composition chimique complexe de l'eau et des colloïdes des résidus fins mûrs, il est encore extrêmement difficile d'exécuter une floculation efficace, un assèchement rapide et la consolidation de résidus fins mûrs pure afin de produire des sols déposables à forte teneur en matières solides supérieure à 70 % en poids. Nous avons mis au point un procédé de coacervation autocurable inspiré par le phragmatopoma californica pour le traitement des résidus fins mûrs, en utilisant le floculant polymère cationique avec une architecture hyperramifiée, un polyéthylèneimine (PEI) ramifié, qui est une faible polybase non sensible à la force ionique, et l'oxyde de polyéthylène difonctionnel (DFPEO), un adhésif propre à la PEI. Il a été démontré que ce nouveau procédé et la nouvelle méthode pouvaient améliorer considérablement la propriété mécanique des résidus fins mûrs floculés et récupérer l'eau d'entrée contenue dans les résidus fins mûrs en peu de temps, et ce, conjointement avec une compression à deux étapes. Les essais de sédimentation exécutés sur les résidus fins mûrs réels ont révélé que ce nouveau procédé et cette nouvelle technologie pouvaient consolider de façon efficace les résidus fins mûrs floculés pour le dépôt direct. À notre connaissance, il s'agit de la première méthode dans le domaine du traitement des résidus fins mûrs qui pourrait récupérer de façon efficace et en moins d'une heure 30 % en poids de l'eau présente dans les résidus fins mûrs et atteindre un taux de libération totale de l'eau de 70 % en moins d'une heure environ au moyen d'une légère compression (p. ex., une pression de 10 bars), ce qui améliorerait considérablement la teneur en matières solides des résidus fins mûrs pressés qui passerait de 30 % à environ 75 % en poids et qui permettrait le dépôt direct ainsi que la remise en état des terres.

Le procédé mis au point en associant le procédé de floculation par coacervation et une compression à deux étapes est compatible avec les procédés commerciaux existants tels que le procédé de réduction des résidus (PRR) de Suncor Energy et le procédé de floculation-centrifugation de Syncrude Canada Ltd. En outre, il pourrait être intégré à certains de ces procédés commerciaux. Ces technologies commerciales du traitement des résidus utilisent toutes une quantité importante de floculants polymères et elles améliorent le procédé d'assèchement en ayant recours à différentes méthodes (p. ex., la centrifugation) qui sont généralement très énergivores et qui nécessitent beaucoup de temps. Les nouveaux floculants polymères élaborés dans le cadre de ce projet peuvent être utilisés seuls ou avec des floculants commerciaux pour le traitement des résidus des sables bitumineux, ce qui permet d'assécher plus efficacement ces derniers et facilite la remise en état des terres pour le secteur des sables bitumineux.

4 Conclusions

Grâce au projet proposé, les travaux de recherche ont amélioré et approfondi les connaissances fondamentales sur la sédimentation des fines particules solides et sur la suppression de substances

dangereuses dans les résidus des sables bitumineux, ce qui contribue à réduire l’empreinte environnementale de l’exploration, l’extraction et le traitement des énergies fossiles. Nous avons également élaboré de nouveaux flocculants et des stratégies de sédimentation pour le traitement des résidus des sables bitumineux. La compréhension des propriétés interfaciales et de la sédimentation des résidus aux échelles macro micro et nano, voire même au niveau moléculaire est essentielle pour résoudre les problèmes difficiles que posent les résidus afin d’augmenter le recyclage de l’eau et sa réutilisation dans le secteur de l’ingénierie minier et de l’industrie minière. Notre projet a permis d’élaborer de nouveaux flocculants, d’acquérir de nouvelles connaissances et technologies afin de résoudre les difficiles problèmes que posent le traitement des résidus, et le recyclage et la réutilisation de l’eau, ce qui est crucial pour la mise en valeur continue et durable des vastes ressources de sables bitumineux du Canada et qui peut être appliqué à d’autres résidus minéraux et aux industries du traitement de l’eau.

En principe, les industries des sables bitumineux et les industries des minéraux peuvent toutes être les bénéficiaires des travaux que nous proposons. L’industrie des sables bitumineux utilise actuellement des procédés d’extraction à l’eau classiques qui augmentent la salinité de l’eau libérée recyclée et qui produisent des résidus dont les propriétés de sédimentation et de consolidation sont médiocres. Le volume des résidus fins augmente à un taux de 0,1 m³ environ la tonne de sables bitumineux traités. En outre, l’accroissement des résidus fins mûrs est de l’ordre de 0,06 à 0,15 m³ la tonne de sables bitumineux traités. Plus de 170 kilomètres carrés de bassins de résidus se trouvent dans la région de production des sables bitumineux. Comme la capacité des usines existantes est en augmentation et que de nouvelles usines sont en construction, le stock actuel de 800 millions de mètres cubes de résidus fins mûrs augmentera à un rythme beaucoup plus rapide et atteindra un milliard de mètres cubes dans quelques années. La demande d’eau est en train de devenir un goulet d’étranglement pour la mise en valeur future des sables bitumineux. Toutes les grosses sociétés minières (sables bitumineux, métaux de base et charbon), telles que CNRL, Syncrude, Imperial Oil, Shell, Suncor, Teck et TOTAL seront les bénéficiaires possibles de ces travaux. Les résultats de notre recherche ont contribué à mettre au point des technologies novatrices, très efficaces, économiques et écologiques pour traiter les résidus des sables bitumineux et améliorer les procédés d’assèchement, ce qui renforce la capacité du Canada de mettre en valeur, de façon durable, d’importantes ressources pétrolières et gazières non classiques et de réduire les effets indésirables sur l’environnement.

4.1 Les avantages et les résultats du projet

Le Canada possède le réservoir de sables bitumineux le plus vaste au monde. Bien que le pays bénéficie d’une croissance économique saine basée sur d’abondantes ressources naturelles, le secteur des sables bitumineux et les sociétés minières sont confrontés à de grands défis techniques et environnementaux. Le secteur des sables bitumineux utilise actuellement le procédé classique d’extraction à l’eau chaude de Clark, qui fonctionne à des pH élevés, augmente la salinité de l’eau libérée recyclée et dont les propriétés de sédimentation et de consolidation sont médiocres. Le volume des résidus fins augmente à un taux de 0,1 m³ environ la tonne de sables bitumineux traités. En outre, l’accroissement des résidus fins mûrs est de l’ordre de 0,06 à 0,15 m³ la tonne de sables bitumineux traités. Plus de 170 kilomètres carrés de bassins de résidus se trouvent dans la région de production des sables bitumineux. Comme la

capacité des usines existantes est en augmentation et que de nouvelles usines sont en construction, le stock actuel de 800 millions mètres cubes de résidus fins mûrs augmentera à un rythme beaucoup plus rapide et atteindra un milliard de mètres cubes dans quelques années. L'eau représente une composante importante du traitement des sables bitumineux et des minéraux, et la demande d'eau est en train de devenir un goulet d'étranglement pour la mise en valeur future des sables bitumineux. La gestion de l'eau est essentielle à la mise en valeur continue et durable des vastes ressources de sables bitumineux du Canada, ce qui a été le principal objectif de ce projet.

Le projet de recherche a porté sur les problèmes difficiles du traitement des résidus des sables bitumineux et de la gestion de l'eau. Les résultats de la recherche ont contribué à la mise en valeur continue et durable des ressources de sables bitumineux de l'Athabasca. Ces résultats ont permis d'améliorer la compréhension fondamentale de la sédimentation des résidus des sables bitumineux et de la gestion de l'eau, ce qui contribue à réduire l'empreinte environnementale de l'exploration, de l'extraction et du traitement des énergies fossiles. Les résultats de ce projet contribueront également à mettre au point des méthodes et des technologies novatrices, très efficaces, économiques et écologiques pour l'extraction du bitume et à améliorer les procédés d'assèchement et la capacité du Canada à mettre en valeur de façon durable les ressources pétrolières et gazières non classiques et à réduire les incidences sur l'environnement. Les avantages et les résultats obtenus de ce projet sont les suivants :

Meilleure compréhension de la sédimentation des résidus des sables bitumineux et de la gestion de l'eau, et mise au point de méthodes et de technologies novatrices, très efficaces, économiques et plus écologiques en vue d'améliorer les procédés d'assèchement : Les flocculants polymères ont été considérablement utilisés pour le traitement industriel de l'eau et dans certains procédés commerciaux pour le traitement des résidus des sables bitumineux. Par exemple, le procédé de réduction des résidus (PRR) associe la floculation des polymères et le dépôt de couches minces. Cependant, aucun procédé et technologie du commerce ne peut vraiment assécher efficacement les résidus fins mûrs afin de respecter la réglementation du gouvernement. En outre, ces procédés commerciaux requièrent généralement des étapes de prétraitement supplémentaires telles que la dilution ou l'ajout de sables grossiers pour obtenir des résultats acceptables de sorte que les résidus fins mûrs pourraient être asséchés de façon appropriée et être consolidés dans une certaine mesure, ce qui est généralement énergivore et qui requiert beaucoup de temps. Par conséquent, il est d'une importance fondamentale et pratique de comprendre les mécanismes d'interaction entre les particules d'argile, l'eau, les ions et le bitume dans les résidus des sables bitumineux et les flocculants polymères aux échelles nano, micro et macro, et d'élaborer des flocculants polymères très efficaces, économiques et écologiques pour permettre l'assèchement, la consolidation et la densification efficaces des résidus fins mûrs. Ce projet de recherche a abouti à la constitution d'une bibliothèque unique de méthodologies qui a permis la caractérisation des mécanismes d'interaction de base entre les particules solides, l'eau et le bitume dans les résidus des sables bitumineux et les flocculants polymères, ce qui a révélé que la composition complexe de l'eau dans les résidus des sables bitumineux pourrait affecter considérablement les interactions interfaciales entre les particules solides et les flocculants polymères ajoutés. En nous fondant sur ces connaissances fondamentales, nous avons conçu et élaboré des flocculants polymères efficaces,

bio-inspirés et un procédé de floculation par coacervation, ce qui convient au traitement des différents résidus des sables bitumineux allant des résidus issus de l'extraction aux résidus fins mûrs. Par exemple, en nous fondant sur le floculant polymère cationique créé avec une architecture hyperramifiée, la polyéthylèneimine ramifiée cationique (PEI), qui est une faible polybase non sensible à la force ionique, et l'oxyde de polyéthylène difonctionnel (DFPEO), nous avons mis au point un procédé de coacervation autocurable pour le traitement des résidus fins mûrs. Il a été démontré que le nouveau procédé et la nouvelle méthode pouvaient améliorer considérablement la propriété mécanique des résidus fins mûrs floculés et récupérer en peu de temps l'eau d'entrée des résidus fins mûrs, et ce, conjointement avec une compression à deux étapes. Les essais de sédimentation que nous avons exécutés sur les résidus fins mûrs réels ont révélé que ce nouveau procédé et cette nouvelle technologie pouvaient consolider de façon efficace les résidus fins mûrs floculés pour le dépôt direct. À notre connaissance, il s'agit de la première méthode dans le domaine du traitement des résidus fins mûrs qui peut récupérer de façon efficace et en moins d'une heure 30 % en poids de l'eau présente dans les résidus fins mûrs et atteindre un taux de libération totale de l'eau de 70 % en poids en environ une heure au moyen d'une légère compression (p. ex., une pression de 10 bars), ce qui améliore considérablement la teneur en matières solides des résidus fins mûrs pressés qui est passée de 30 % à environ 75 % en poids et qui permet le dépôt direct et la remise en état des terres.

Toutes les informations et les connaissances accumulées peuvent être reprises et utilisées par les intervenants du secteur des sables bitumineux. Les technologies de la sédimentation des résidus mises au point et les stratégies de gestion de l'eau ajouteront considérablement des valeurs supplémentaires aux travaux importants qui ont été exécutés dans le domaine des résidus dans le secteur des sables bitumineux et des instituts de recherche au Canada. Le projet de recherche a contribué à faire progresser l'engagement du Canada de réduire les incidences environnementales de la production, de la conversion et de l'utilisation de l'énergie, y compris de donner suite à l'engagement pris par le gouvernement du Canada, de contribuer à la réduction d'autres émissions atmosphériques ainsi qu'aux autres avantages environnementaux tels que la propreté de l'eau et la salubrité des terres. Les résultats de la recherche contribuent à résoudre les difficiles problèmes que pose l'eau dans les résidus lors de l'extraction des sables bitumineux et à soutenir la mise au point des technologies de la prochaine génération qui ciblent le profil et les besoins énergétiques du Canada et qui visent à répondre à ceux-ci. Les nouveaux floculants ainsi que les technologies et les procédés mis au point dans le cadre de ce projet contribuent à la prospérité et à la compétitivité du Canada, et soutiennent et améliorent, en particulier, la compétitivité du secteur des technologies propres du Canada en s'appuyant sur les atouts et l'avantage concurrentiel de ce dernier.

Des possibilités de formation offertes au personnel hautement qualifié susceptible d'être embauché dans l'avenir par le secteur des minéraux et de l'énergie du Canada : Le projet de recherche porte sur le traitement des résidus des sables bitumineux et des initiatives de gestion d'eau connexes, et contribue à la mise en valeur continue et durable des sables bitumineux et d'autres ressources minérales du Canada. Ce projet est axé sur le domaine interdisciplinaire de l'ingénierie chimique, de l'ingénierie des matériaux, de la nanotechnologie, de l'énergie, de l'ingénierie pétrolière et de l'ingénierie environnementale. On a offert au personnel hautement qualifié la possibilité de bénéficier d'une

formation dans diverses techniques uniques de pointe et perfectionnées et dans des méthodologies expérimentales telles que l'appareil de forces de surface (AFS), la microbalance à cristal de quartz avec surveillance de la dissipation (MCQ-D) et la mesure de la réflectance d'un faisceau focalisé (MRFF) afin d'étudier les mécanismes d'interaction de base entre les particules d'argile, l'eau, les ions et les flocculants polymères aux échelles nano, micro et macro. Grâce à la recherche proposée, le personnel hautement qualifié a maîtrisé l'application de ces techniques et méthodologies afin de relever le défi industriel pratique auquel est confronté le secteur des sables bitumineux au moyen de la création de flocculants polymères bio-inspirés et de soutenir ainsi la mise en valeur durable des ressources énergétiques naturelles en Alberta. Le personnel hautement qualifié était supervisé conjointement par les PI et les co-chercheurs principaux. Il peut publier ses résultats de recherche dans de grands journaux spécialisés dans ce domaine et présenter ses résultats lors de congrès nationaux et internationaux et d'ateliers, et interagir avec les chercheurs de différentes disciplines. Le personnel hautement qualifié (PHQ) de ce projet possède une vaste expérience de travail dans un environnement de recherche multidisciplinaire dans le cadre de synergies de collaboration entre la recherche universitaire et la recherche industrielle, ce qui lui offre un atout considérable pour son embauche future dans le secteur des minéraux et de l'énergie du Canada. Ces personnes sont capables d'intégrer les connaissances de diverses disciplines, de travailler en équipe, de comprendre les besoins industriels et de traiter les problèmes sous l'angle de l'ingénierie des systèmes.

4.2 Quelles sont les prochaines étapes à adopter en recherche et développement dans ce domaine?

Le projet a permis d'effectuer la caractérisation systématique des propriétés des résidus des sables bitumineux (c.-à-d., les types de sels et concentrations, le pH et les particules solides), et a examiné les interactions interfaciales des particules dans les résidus et les flocculants polymères. Les connaissances fondamentales acquises ainsi que les données disponibles dans la littérature peuvent servir de base de données utile pour les universités, et les chercheurs et ingénieurs industriels dans le domaine afin de concevoir des technologies améliorées visant une meilleure utilisation et gestion de l'eau dans les ressources naturelles, dans les industries canadiennes, et ce, à moyen terme (5 à 10 ans, voire au-delà). Les flocculants polymères bio-inspirés et écologiques élaborés dans le cadre de ce projet, tels que polysaccharides (p. ex., basés sur le chitosane fonctionnalisé et les dérivés des chitosanes), peuvent être utilisés seuls ou avec des flocculants commerciaux pour le traitement des résidus des sables bitumineux, ce qui peut contribuer à assécher plus facilement les résidus des sables bitumineux et faciliter la remise en état des terres pour le secteur des sables bitumineux. Le procédé mis au point en associant le procédé de floculation par coacervation et une compression à deux étapes est compatible avec les procédés commerciaux existants tels que le procédé de réduction des résidus (PRR) de Suncor Energy et le procédé de floculation-centrifugation de Syncrude Canada Ltd. En outre, il pourrait être intégré à ces procédés commerciaux. L'élaboration et l'application réussies des nouveaux polymères biomimétiques et écologiques nous ont incités à mettre au point des technologies plus novatrices pour le traitement futur des résidus fins mûrs. Lors des prochaines étapes adoptées dans le de ce projet, nous travaillerons avec l'industrie pour continuer à examiner comment intégrer efficacement les flocculants et le procédé

de floculation que nous avons mis au point aux flocculants commerciaux et aux procédés de traitement des résidus utilisés actuellement par le secteur des sables bitumineux.