

# Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 21

## Végétalisation durable des parcs à résidus des mines de fer du Nord-Est du Québec et du Labrador : choix des espèces végétales, création d'un sol vivant et symbioses racinaires microbiennes

Christine JUGE et Normand COSSETTE


[www.set-revue.fr](http://www.set-revue.fr)

English | [Mettre en ligne](#) | [Abonnement RSS](#) | [Facebook](#) | [Twitter](#)

Recherche avancée | Dans tout le site

---

**Accueil**

Quelques nouvelles

- La Trame verte et bleue
- Aide à la décision pour le développement territorial
- Mobilisation agricole
- L'ingénierie en France

Articles Hors-Série

Un règlement européen relatif à la gestion des CEE

Statut de l'analyse territoriale des parcelles des exploitations agricoles conciliées par une AAC

Viabilité de la rose du fleuve et autres espèces dans le delta interne du Niger

Cahiers spéciaux

Cahier spécial 50 ans de l'Orignal

Cahier spécial Forêt

Cahier spécial QPTEAN

Toutes les périodes

À propos de la revue

Présentation

Intervenants aux ateliers

Alertes mail

Contactez la rédaction

---

**La Trame verte et bleue**  
Séminaire et perspectives pour l'action territoriale

La trame verte et bleue est une des menaces importantes de la loi du Grenelle de l'environnement. En quelques années, elle est devenue un outil d'aménagement du territoire qui vise à préserver, voire à reconstruire la biodiversité au travers de la constitution de réservoirs de biodiversité reliés par des ...

➤ Voir le sommaire

**n°14**  
3 Octobre 2014

Autres numéros SET | Archives Ingénieries EAT

---

**Alertes mail**

Pour se tenir informé des nouveaux articles parus dès leur mise en ligne...

Écrivez ici

---

**À propos**

Les macrophytes et nous : de la concurrence au partenariat

➤ Voir le sommaire

**Sciences Eaux & Territoires**

---

**SET sur Twitter**

Like our latest tweets

### Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 21 – 2015

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal

Directeur éditorial : Nicolas de Menthère

Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, Thomas Curt, Alain Dutartre, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Hérault, Ghislain Huyghe, Alette Maillard, Emmanuelle Jannès-Ober, Cédric Laize, Jean-Michel Laya, André Le Bozec, Christel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOV TEN et Michel Vallance. Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagnoux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : C Bat

Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : [set-revue@irstea.fr](mailto:set-revue@irstea.fr)

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution

N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : Normand Cossette



## Végétalisation durable des parcs à résidus des mines de fer du Nord-Est du Québec et du Labrador : choix des espèces végétales, création d'un sol vivant et symbioses racinaires microbiennes

La végétalisation des parcs à résidus des mines de fer du Nord-Est du Québec et du Labrador fait face à plusieurs défis techniques, dus à la pauvreté du substrat, à l'importance de l'érosion éolienne et au climat nordique. Depuis bientôt vingt ans, l'entreprise Irrigation Norco inc. relève efficacement ces défis sur certains secteurs en utilisant une technologie basée sur l'utilisation primaire de paillis de foin pour contrôler l'érosion éolienne, une connaissance approfondie de la flore locale et adaptée à la région, et l'apport de fertilisants biologiques permettant, outre l'apport d'amendements organiques, de rétablir la vie microbienne du sol.



L'entreprise Irrigation Norco inc. végétalise les parcs à résidus générés par quatre mines de fer du Nord-Est du Québec (région de Fermont) et du Labrador (près de Labrador-City) : la mine de Wabush, Labrador, depuis 1996, la mine d'IOC, Labrador, depuis 1999, la mine du Mont-Wright, Québec, depuis

2010 et la mine du Lac Bloom, Québec, depuis 2012 (Québec Mines, 2010).

Dans cette région nordique (52-53° parallèle), appartenant au zonobiome de transition entre la forêt boréale et la toundra arctique (Grabherr, 1999) et balayée toute l'année par des vents du nord parfois violents, ces étendues arides de fines particules siliceuses que sont les parcs à résidus miniers – couramment appelées « tailings » – générées massivement par broyage mécanique de la roche après extraction du minerai et rejetées dans la nature, sont vouées à se maintenir à l'état de « déserts artificiels » si aucun effort de végétalisation n'est entrepris. L'état encore quasi désertique, trente ans après sa fermeture, du parc à résidus du Lac Jeanine, près de l'ancienne ville minière de Gagnon, à 180 km de là, en est le parfait témoin. Il s'agit d'un site minier orphelin typique, tel qu'il en existe des centaines au Québec.

### ① GLOSSAIRE

**Symbiose** : association cellulaire et physiologique, à bénéfice réciproque, entre deux êtres vivants.

**Zonobiome** : écosystème disposant d'une même température moyenne et du même volume de précipitations.

**Mycorhize** : association symbiotique quasi universelle entre les plantes et les champignons mycorrhiziens. La plante fournit son carbone au champignon, qui en retour l'approvisionne en eau et en minéraux essentiels, les réseaux d'hyphes mycéliens augmentant de manière considérable la surface d'absorption racinaire.

**Inoculum** : échantillon contenant des microorganismes vivants, destiné à être introduit au sein d'un milieu favorable à sa multiplication, afin de l'identifier, de l'étudier ou d'en produire une quantité supérieure.

**Hyphe, ou filament mycélien** : structure végétative souterraine des champignons et élément fondamental de la structure d'un sol vivant.

**Foliaire** : qui concerne la partie feuillue des végétaux herbacés ou ligneux.

**Gel par advection** : gel provoqué par le passage d'une masse d'air froid venue d'une autre région, quand les vents sont relativement forts, par opposition au gel de rayonnement (ou gelée blanche), qui se produit seulement de façon localisée et par nuit claire et calme.



1 Étapes successives de végétalisation :

- a) résidu minier vierge ;
- b) paillis de foin et bio-fertilisants ;
- c) semis de mélanges de graines adaptées ;
- d) première année : levée des semis hâtifs ;
- e) huitième année secteur mine Wabush ;
- f) dixième année secteur mine IOC ;

en arrière plan : installations de la mine IOC.



e

© N. Cossette

Le succès de toute végétalisation durable repose sur des connaissances biologiques et microbiologiques approfondies adaptées à l'écosystème et au climat (Huang *et al.*, 2012). Au Québec, d'autres travaux ont été réalisés avec succès sur la base notamment d'une solide expertise scientifique en microbiologie des sols (Bordeleau et Juge, 2014; Khasa *et al.*, 2014).

La technologie, utilisée ici avec succès pour réimplanter durablement la végétation sur ces terrains sableux (photo 1 a), est basée sur une connaissance approfondie de la flore de la région et l'implantation d'espèces végétales adaptées à ces conditions arides et la zone de rusticité nordique. Trois composantes additionnelles sont essentielles pour assurer la germination et le maintien des végétaux réintroduits : l'épandage primaire de foin, utilisé comme paillis pour enrayer l'érosion éolienne avant le premier semis (photo 1 b), l'usage de biofertilisants riches en micro-organismes pour réintroduire la vie microbienne dans le sol (photo 1 b), et la présence des symbiotes racinaires microbiens, indissociables des plantes depuis leur première apparition sur terre, il y a plus de 450 millions d'années. Ces trois composantes assurent la formation progressive d'un sol vivant et fertile (Gobat *et al.*, 2010), seul capable de permettre le développement subséquent des plantes sans intervention humaine (photo 1 c,d,e,f).

### La création d'un sol fertile

De par sa granulométrie, le résidu minier sablonneux est constitué de 82 à 94% de sable, de 2 à 11% de limon, et de moins de 5% d'argile. Son contenu en matière organique est initialement nul, toujours sous la marge d'erreur standard ou sous le seuil minimal communément

mesurable de 0,1% de la masse sèche. Cet état de fait justifie pleinement l'apport initial d'amendements organiques, qui permettent d'instaurer une fertilité primaire dans ce substrat inhospitalier pour les plantes. Ce portrait granulométrique est typique des résidus de broyage et de raffinage issue de l'exploitation des gisements ferreux de la formation géologique qu'on connaît sous le nom de « Fosse du Labrador ».

## 2 COMBATTRE L'ÉROSION ÉOLIENNE : LE CONCEPT DE HAIES MICRO BRISE-VENTS

Une haie brise-vent sur une ferme ou près d'une serre permet de réduire de manière significative la vitesse du vent sur une distance d'environ dix à vingt fois la hauteur de la haie, une vitesse qui devient nulle à environ 70% de la hauteur moyenne du couvert végétal (Morgan, 2005). Une rangée de semis procure le même résultat sur une échelle plus petite, l'effet de « micro brise-vent » obtenu s'intensifiant à mesure que s'allongent les semis. Sur le terrain, nous avons constaté que la vitesse du vent est réduite de façon significative sur sept à dix fois la hauteur moyenne des semis. L'application méthodique de ce concept dans nos projets est essentielle pour la réussite de la végétalisation sur les résidus miniers sableux. Avant les semences, l'épandage d'un généreux paillis de foin (approximativement 4 500 kg de foin sec par hectare) et son ancrage en surface à l'aide d'une herse à disque modifiée, protège les jeunes semis des effets de l'abrasion par le sable, et ce pendant toute la durée de leur émergence du sol, le temps qu'un effet micro brise-vent se manifeste. Le foin ou la paille constituent également un amendement organique supplémentaire, en apportant une plus grande biodiversité (micro-organismes, graines de plantes adventives, etc.).

► L'évolution des paramètres de sol au fil du temps permet de constater l'enrichissement progressif des sols suite à la végétalisation du résidu, en fonction des caractéristiques physico-chimiques initiales du résidu minier (éléments minéraux et pH). À partir de 2005-2006, l'utilisation massive de fumiers de volaille, riches en calcium et en micro-organismes, a permis d'augmenter la saturation en cations, le pH et la proportion de matière organique sur le site de Wabush (figure 1).

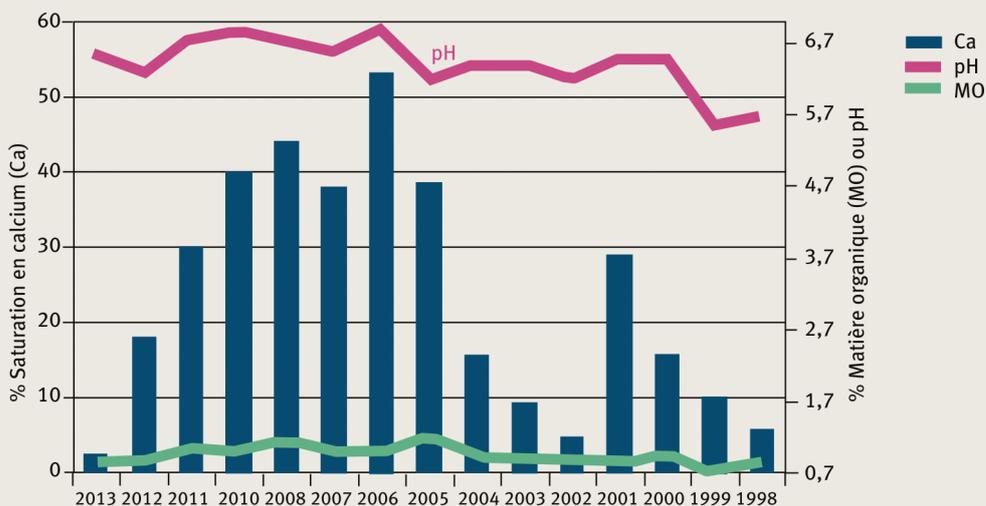
### Installation de la mycorhization racinaire selon les espèces végétales

La symbiose racinaire mycorhizienne arbusculaire, présente sur terre depuis la première apparition des végétaux terrestres (i.e. environ 450 millions d'années), en procurant une nutrition minérale efficace et

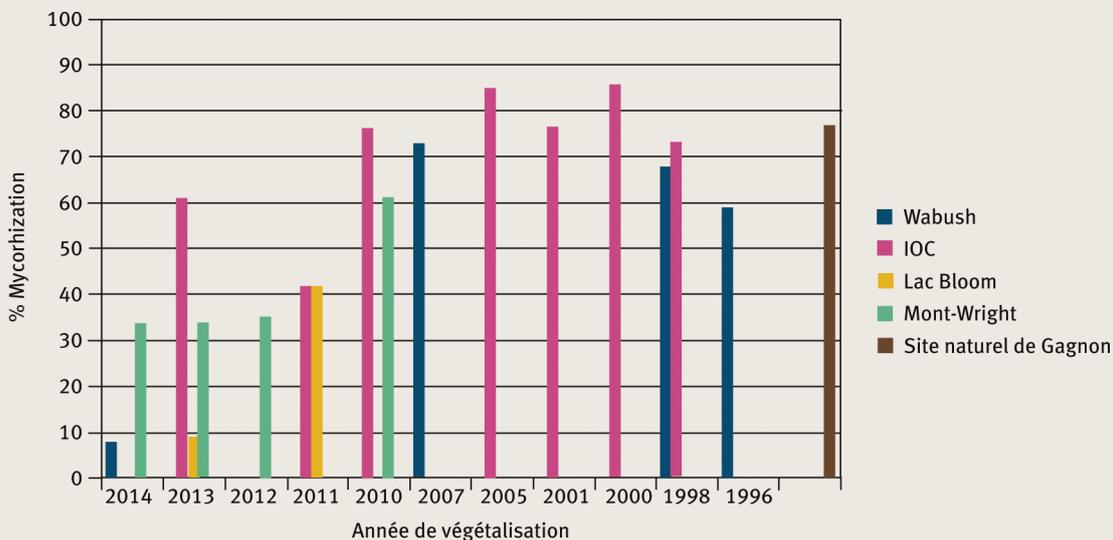
une protection contre les pathogènes et diverses perturbations environnementales, est essentielle pour la santé des plantes, l'équilibre microbien et la structure du sol, et garante de la viabilité et de la durabilité des écosystèmes nouvellement recréés (Fortin *et al.*, 2008). À la fin de l'été 2014, des échantillons des principales espèces de plantes réintroduites et réapparues spontanément après plusieurs années, provenant d'emplacements différents sur les quatre sites de résidus miniers végétalisés depuis un à dix-huit ans, ont été prélevés, et leurs racines ont été traitées et colorées dans le but d'évaluer leur statut mycorhizien en fonction de l'âge de végétalisation des sites et des espèces de plantes.

Les résultats généraux indiquent qu'à l'exception d'une parcelle exceptionnellement mycorhizée (61 %) sur le résidu d'IOC végétalisé en 2013, l'installation de la mycorhization au cours du temps est progressive et

1 Évolution de la saturation du sol en cations, du pH et de la matière organique (MO) sur le site de Wabush.



2 Évolution de la mycorhization sur les quatre sites miniers en fonction de l'année de végétalisation.



régulière : durant les trois premières années suivant la végétalisation (sites végétalisés de 2011 à 2014), les plantes sont généralement faiblement mycorhizées (de 0 à 40% en moyenne), tandis qu'après quatre ans de végétalisation (sites végétalisés de 1996 à 2010), les niveaux de mycorhization racinaire sont plus élevés (61 à 85% en moyenne) et proches des niveaux observés sur un site naturel à proximité (Lac Jeannine, ancienne ville minière de Gagnon) (figure 2).

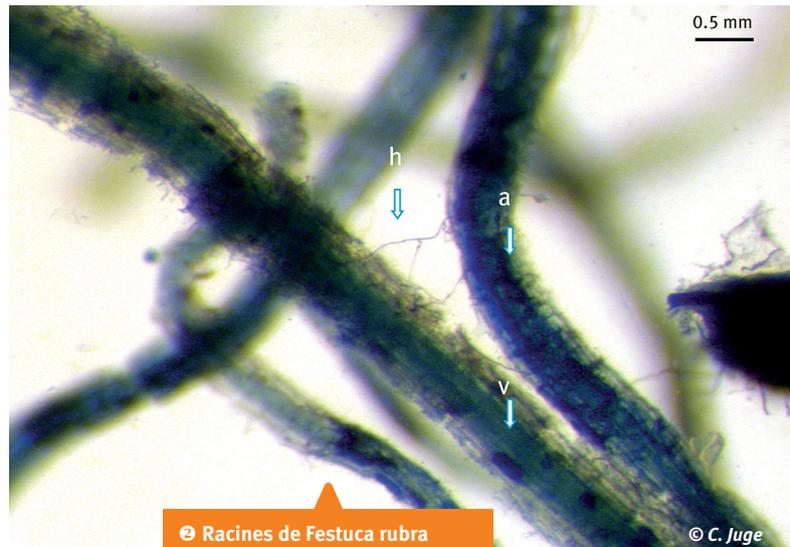
Ceci s'explique par la réinstallation progressive des réseaux mycéliens de champignons mycorhiziens dans ces sols nouvellement créés, grâce à la réintroduction de la végétation et aux amendements de matière organique et de fumiers de volaille riches, incluant la litière, qui contiennent des inoculum fongiques.

Plus spécifiquement, nous avons observé :

- une grande variabilité du taux général de mycorhization selon les espèces, certaines, telles que les espèces de légumineuses, la deschampsie cespiteuse et les deux espèces du genre *Elymus*, ayant des taux de mycorhization particulièrement élevés (55 à 95% en moyenne), tandis que d'autres, à l'inverse, telles que l'avoine et le sarrasin, ont montré des taux de mycorhization très faibles (9 à 18%);
- une grande variabilité du stade de mycorhization observé (photo 2).

Pour la majorité des espèces récemment réintroduites (2011 à 2014) dont les taux de mycorhization sont faibles ou moyens (9-61%), la majorité des structures fongiques intraradicales observées à la fin de l'été sont des hyphes mycéliens (7-37%), ce qui est le signe d'une mycorhization tardive, tandis que les deux stades suivants de la symbiose, les stades arbusculaire et vésiculaire, sont rarement observés (0-14%) (Juge *et al.*, 2009). Pour d'autres espèces, dont les niveaux de mycorhization sont intermédiaires à élevés (42 à 94%), le stade arbusculaire était présent en proportions analogues au stade hyphal. C'est le cas des deux espèces de fétuque (*Festuca* sp.) échantillonnées sur les quatre sites miniers, ainsi que la deschampsie cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*) sur le site du Mont-Wright végétalisé en 2012, de l'élyme à chaumes rudes (*Elymus trachycaulus*) sur le site d'IOC de 2000, et de l'euphrase arctique (*Euphrasia frigida*, hémiparasite, famille des Orobanchacées) sur le site de Wabush de 1996. La présence d'arbuscules, constituant le stade fonctionnel de la symbiose, signifie que la mycorhization a été initiée plus tôt au printemps. Ces espèces sont donc particulièrement « mycorhizogènes » et/ou le sol des sites végétalisés contient davantage d'inoculum mycorhiziens, comme c'est le cas dans les sites les plus anciens.

Pour d'autres espèces enfin, le stade vésiculaire, ultime étape du cycle de vie intraracinaire du champignon, était présent en proportions élevées dans les racines, souvent en proportions égales avec les hyphes suspendus des vésicules, tandis que le stade arbusculaire était moins présent. C'est le cas de la majorité des espèces de légumineuses échantillonnées sur plusieurs sites, de l'élyme de sables (*Elymus arenarius*) sur le site d'IOC de 2005 et de l'immortelle blanche (*Anaphalis margaritacea*, famille des Asteraceae) sur le site de Wabush de 2007. Pour ces espèces, hautement « mycorhizogènes »,



2 Racines de *Festuca rubra* montrant de nombreux hyphes (h), arbuscules (a) et vésicules (v) de champignons mycorhiziens arbusculaires.

une mycorhization efficace doit avoir lieu très tôt au printemps, et leur présence sur les surfaces végétalisées assure une propagation rapide des réseaux mycorhiziens du sol vers les racines des autres espèces.

### Tolérance des végétaux au fer et au manganèse

Depuis 1997, trois échantillonnages foliaires sont effectués chaque année, répartis sur trois périodes durant la saison estivale, soit un tiers en début de saison, un tiers en milieu de saison, et un tiers en fin de saison, avant les premiers gels par advection. L'analyse des contenus foliaires au fil de la saison permet de constater, entre autres, la progression des quantités de manganèse et de fer dans les feuilles, parfois jusqu'à des niveaux très élevés. Depuis l'an 2000, année de transition entre un programme de fertilisation qui utilisait beaucoup d'engrais de synthèse et un programme exclusivement organique (fumiers de volaille purs ou mélangés à la litière) depuis, aucun signe visuel de carence ou d'excès n'a été observé sur les différentes espèces végétales réintroduites. Ceci atteste de la grande tolérance des espèces sélectionnées au fer et au manganèse et de l'impact positif des micro-organismes, qui semblent « régulariser » l'absorption par les racines de ces deux oligo-éléments (Fe et Mn) présents dans la solution du sol. En particulier, la présence des symbiotes fongiques racinaires, confirmée par nos analyses de 2014, contribue à protéger les plantes contre leurs effets toxiques en accumulant ces minéraux dans leurs hyphes mycéliens.

### Conclusion

Les différentes analyses réalisées sur les quatre sites de résidus miniers de la région de Fermont et de Labrador City confirment la conversion du résidu minéral et stérile en sol fertile et bien vivant, le travail de végétalisation,

réalisé depuis 1996 à Wabush, 1998 sur le site d'IOC, 2010 au Mont-Wright et 2012 au Lac Bloom, ayant permis d'amorcer et d'accélérer le processus naturel de pédogenèse, en recréant de manière entièrement écologique un écosystème complet et durable.

La réintroduction des espèces végétales appropriées est associée à une mycorhization racinaire efficace pour la plupart de ces espèces, après quelques années de végétalisation seulement et sans aucun apport d'inoculants mycorhiziens spécifiques commerciaux. Cela signifie que la technologie utilisée, tant du point de vue du choix des végétaux que des amendements organiques fertilisants, est très efficace pour initier les associations bénéfiques naturelles sol-plantes-microbes, ce qui assure la durabilité de la végétation réintroduite.

Nous avons montré que certaines espèces, telles que la plupart des légumineuses et celles du genre *Elymus*, semblent particulièrement efficaces pour l'établissement de la mycorhization très tôt au printemps, ce qui leur confère un statut prioritaire dans les mélanges de graines. D'autres, telles que l'avoine, utilisée comme culture de couverture sur les quatre sites miniers et traditionnellement associée au seigle d'automne (*Secale cereale* « biennis ») ainsi que récemment au sarrasin, sont peu mycorhizées et auraient avantage à être inoculées avec des propagules mycorhiziennes, ou remplacées par des variétés favorisant une mycorhization plus rapide ou plus efficace.

Pour les années à venir, l'expansion du travail de réhabilitation des quatre sites de résidus miniers, en répandant la végétation et ses symbioses racinaires sur des surfaces plus grandes, continuera à propager et à multiplier les réseaux symbiotiques mycorhiziens dans ces sols nouvellement recréés, qui acquerront ainsi progressivement leur plein potentiel biologique de fertilisation naturelle.

Parallèlement, le suivi estival de la mycorhization durant les prochaines années, en fonction des plantes et des sites, permettra :

- de vérifier l'implantation progressive de la mycorhization dans les racines des plantes réintroduites et la diffusion des propagules dans les sols végétalisés ;
- de confirmer les résultats obtenus en 2014, en fonction des espèces de plantes, des sites et de l'âge de la végétalisation. En particulier, il sera très utile de réaliser de nouvelles analyses mycorhiziennes à différentes dates entre le mois de juillet et la mi-septembre, soit avant les premiers gels importants, dans le but d'observer la progression de la mycorhization à travers les sites et les espèces de plantes au cours d'une saison complète de végétation.

Il est à souhaiter que l'efficacité de la technologie présentée ici soit mise à profit dans les années à venir pour continuer à végétaliser les centaines d'hectares de résidus miniers vierges restant sur ces sites voués à se maintenir à l'état de déserts artificiels sans intervention humaine (voir l'article dans « *Le Devoir* » du 26 janvier 2015). ■

### Les auteurs

#### Christine JUGE

Ph.D., consultante en microbiologie des sols  
1430 Avenue Charles-Huot  
Québec – Qc, G1T 2M3 – Canada  
✉ [christinejd.juge@gmail.com](mailto:christinejd.juge@gmail.com)

#### Normand COSSETTE

Ingénieur & Agronome  
Irrigation Norco inc.  
211 rue Abraham-Richard  
Varennes – Qc, J3X 1X3 – Canada  
✉ [normand.cossette@irrigationnorco.com](mailto:normand.cossette@irrigationnorco.com)

### EN SAVOIR PLUS...

- **BORDELEAU, L.-M., JUGE, C.**, 2014, Establishing permanent vegetation of the Opemiska tailing site in mid-north Québec: the successful soil-plant-microbes combination, *Canadian Reclamation*, n° 14, p. 28-35.
- **DEN VIRTUELLA FLORAN**, 2013, pages consultées le 14/05/2015 :  
✉ <http://linnaeus.nrm.se/flora/mono/poa/festu/festaruv.jpg> (fétuque élevée),  
✉ <http://linnaeus.nrm.se/flora/mono/poa/desch/desccecv.jpg> (deschampsie cespiteuse),  
✉ <http://linnaeus.nrm.se/flora/di/faba/lotus/lotucorv.jpg> (lotier corniculé).
- **GOBAT, J.-M., ARAGNO, M., MATTHEY, W.**, 2010, *Le sol vivant. Bases de Pédologie – Biologie des sols*, 3<sup>e</sup> édition revue et augmentée, Presses polytechniques et universitaires romandes, 817 p.
- **GRABHERR, G.**, 1999, Zonobiome VIII – Les forêts boréales (taïgas), in: *Guide des Écosystèmes de la terre*, Éditions Eugen Ulmer, Paris, p. 308-313.
- **FORTIN, J.-A., PLENCHETTE, C., PICHÉ, Y.**, 2008, *Les Mycorhizes. La nouvelle révolution verte*, Éditions Quae, Versailles & Multimondes, 131 p.
- **HUANG, L., BAUMGARTL, T., MULLIGAN, D.**, 2012, Is rhizosphere remediation sufficient for sustainable revegetation of mine tailings?, *Annals of Botany*, n° 110, p. 223-238.
- **JUGE, C., COUGHLAN, A.-P., FORTIN, J.-A., PICHÉ, Y.**, 2009, Growth and branching of pre-symbiotic and extraradical Arbuscular Mycorrhizal fungal hyphae: clarification of concepts and terms, in: KHASA, D.-P., PICHÉ, Y., COUGHLAN, A.-P., *Advances in mycorrhizal science and technology*, NRC Research Press, Ottawa, Canada, p. 38-50.
- **KHASA, D., BAUDOIN-NADEAU, M., ROY, S., GREER, C.**, 2014, Phytobial remediation of Sigma-Lamaque Gold Mine waste lands in Val-d'Or, Québec, *Canadian Reclamation*, n° 14, p. 36-39.
- **LE DEVOIR**, 26 janvier 2015, Un siècle pour restaurer 700 sites miniers – la facture est estimée à 1,2 milliard de dollars de fonds publics québécois.
- **MORGAN, R.P.C.**, 2005, *Soil Erosion and Conservation*, Third Edition, Blackwell Publishing, Oxford, p. 39.
- **QUÉBEC MINES**, Ministère de l'énergie et des ressources naturelles du Québec, 2010 :  
✉ <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2010-06/fer.asp> (page consultée le 14/05/15).