



Mycorhizes appliquées au champs: revégétation minière et biofertilisation

**Christine Juge Ph. D.
Mycorhizes 2017, Université Laval, 10-11 mai**

1ère partie: Mycorhizes et revégétation minière

Christine Juge & Normand Cossette

Christine Lethielleux-Juge Ph.D.

Consultante Scientifique

Symbioses Racinaires
Mycorhizes & Sols

418-476-2699

christinejd.juge@gmail.com





M E R D U L A B R A D O R

Labrador

Labrador City

Goose-Bay

Québec

Baie-Comeau

Terre-Neuve

Schefferville

Hopedale

Carwright

Happy Valley-Goose Bay

Henley Harbour

St.-Augustin

Lac Ashuanipi

Sept-Îles

Golfe du Saint-Laurent

PARC NATIONAL DE GROS-MORNE

Sandy Lake

LAURENTIDES
Rivière
Manicouagan
SEPT-ÎLES-
PORT-CARTIER

Détroit de
Belle-
Île, Canada

Magpie

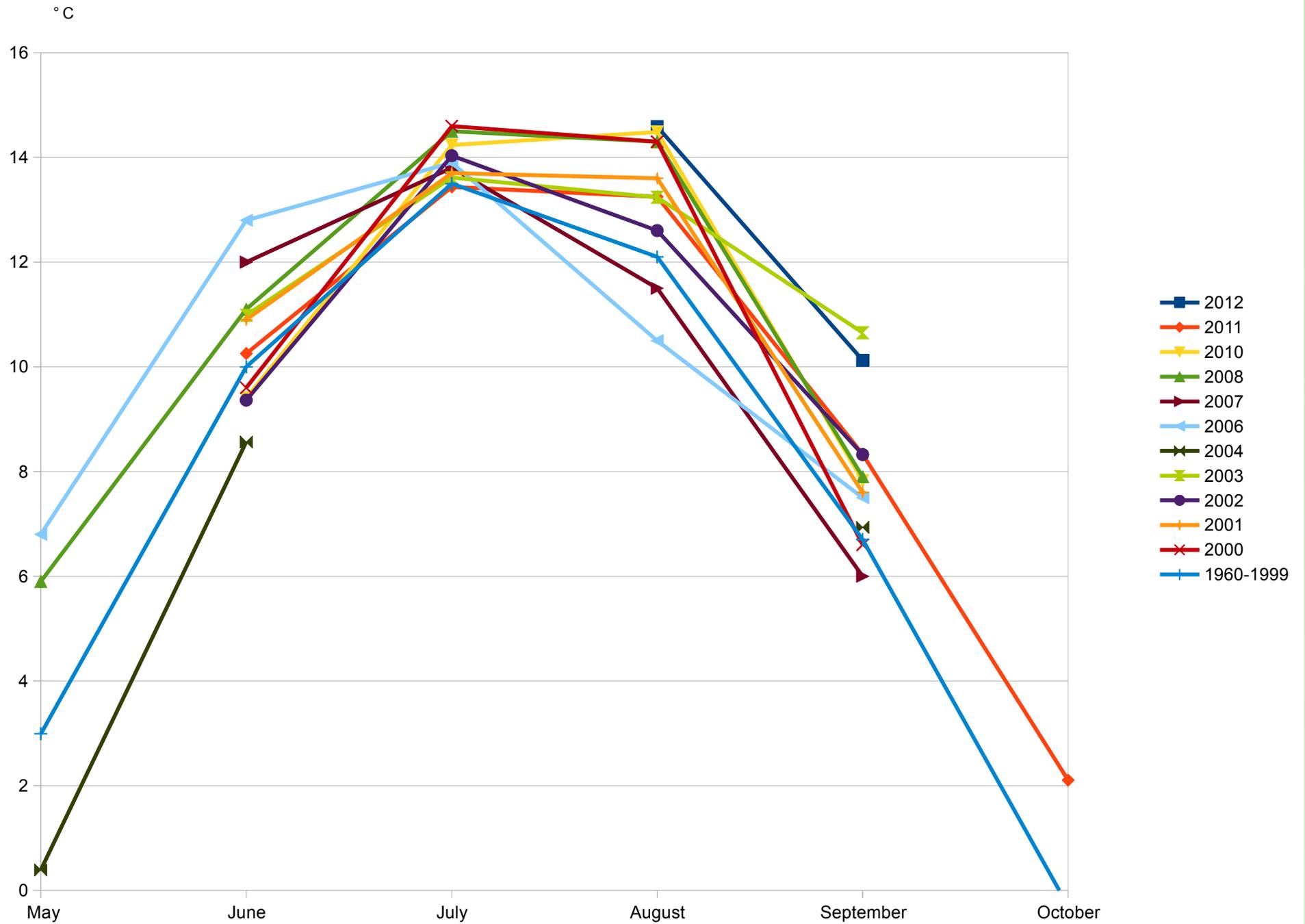
Rivière du
Petit Mécatina

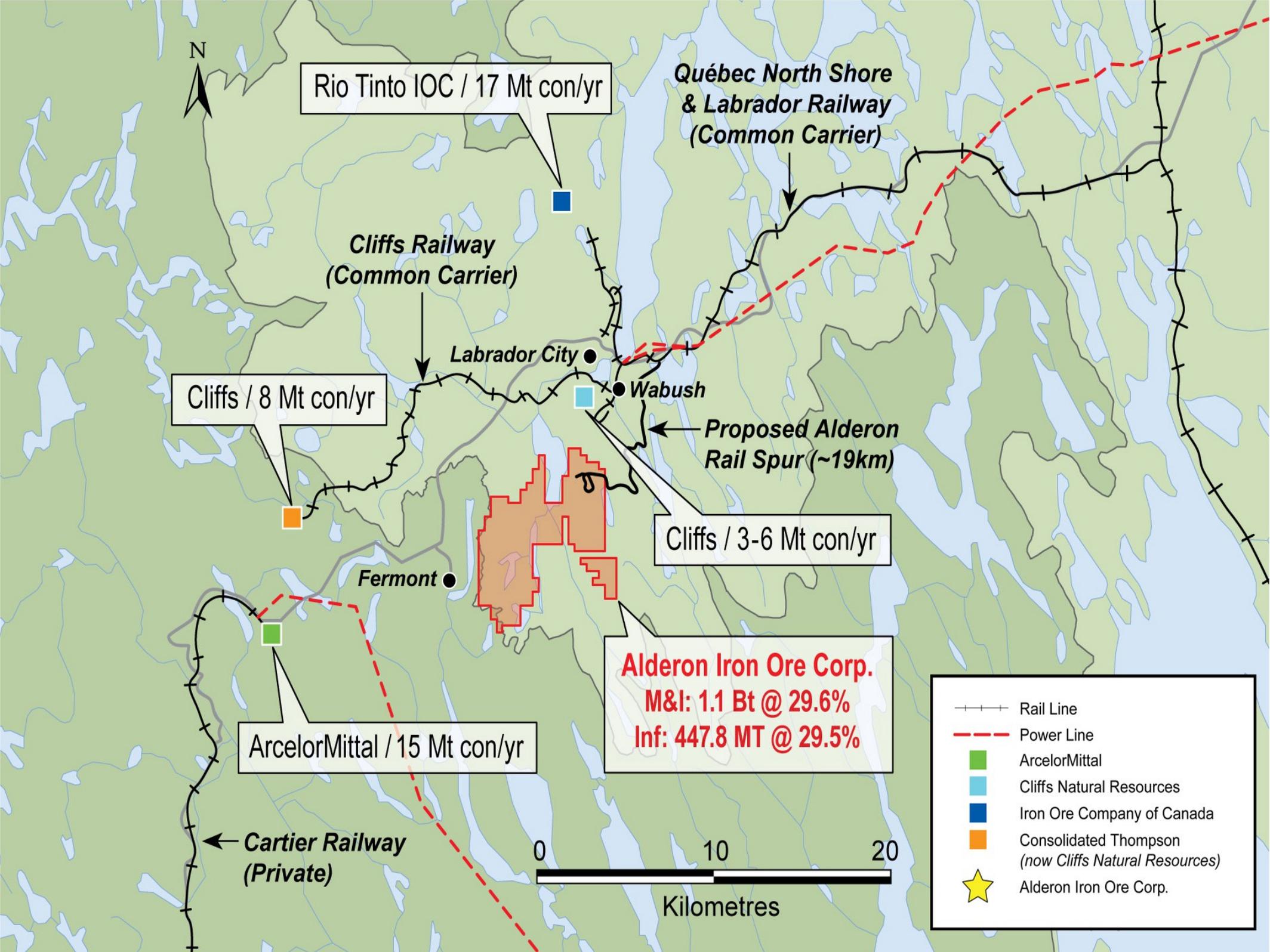
Natashquan

Smallwood
Reservoir

Naskapi

Températures moyennes de l'air - mines de Wabush





4 sites de résidus miniers en cours de végétalisation

- Site de Wabush (Labrador Ouest) depuis 1996 : 1150 ha, dont plus de 750 ha reverdis par Irrigation Norco**
- Site d'IOCC (Labrador Ouest) depuis 1999 : > 1040 ha, dont plus de 620 ha reverdis par Irrigation Norco**
- Site du Mont-Wright (Québec) depuis 2010 : > 1500 ha, dont 185 ha reverdis par Irrigation Norco (25 à 40 ha/an)**
- Site du Lac Bloom (Québec) depuis 2011 : capacité > 1100 ha, dont 45 ha reverdis par Irrigation Norco**



Approximate scale
1000m = 1km

NORTH

NORCO REVEGETATION

Lower FLORA settling basin

Upper FLORA settling basin

Active spillway

Active spillway

Active spillway

Active spillway

Active spillway

WABUSH MINES
Scully Mine tailings disposal area



Végétalisation NORCO: étapes et technologies

- Système d'irrigation (Wabush, 1996-2006)
- Paillis = contrôle de l'érosion éolienne; haies micro brise-vents
- Semis direct de graines d'herbacées adaptées
- Plantation éventuelle de ligneux indigènes
- Bio-fertilisation: fumiers de volaille
- Hydrosemis sur les pentes
- Suivi annuel et fertilisation lorsque requis



Creusage de méandres et irrigation



Paillis pour contrôler l'érosion éolienne



Épandage d'amendements organiques



Bio-fertilisation: fumier de poules pondeuses séché granulé



**=> introduction de microorganismes
et de spores dans le sol recréé
= indispensables pour rétablir
l'équilibre : sol-plantes-microbes**

Semis de graines adaptées



Levée des semis



Croissance de la végétation



Plantations d'arbres et d'herbacées indigènes



50 000 saules brillants [*Salix lucida*]
plantés à Wabush en 2012



Hydrosemeis sur les pentes



Hydrosemeis sur les pentes



Suivi annuel + re-fertilisation selon besoins



Échantillonnage annuel sur les 4 sites miniers

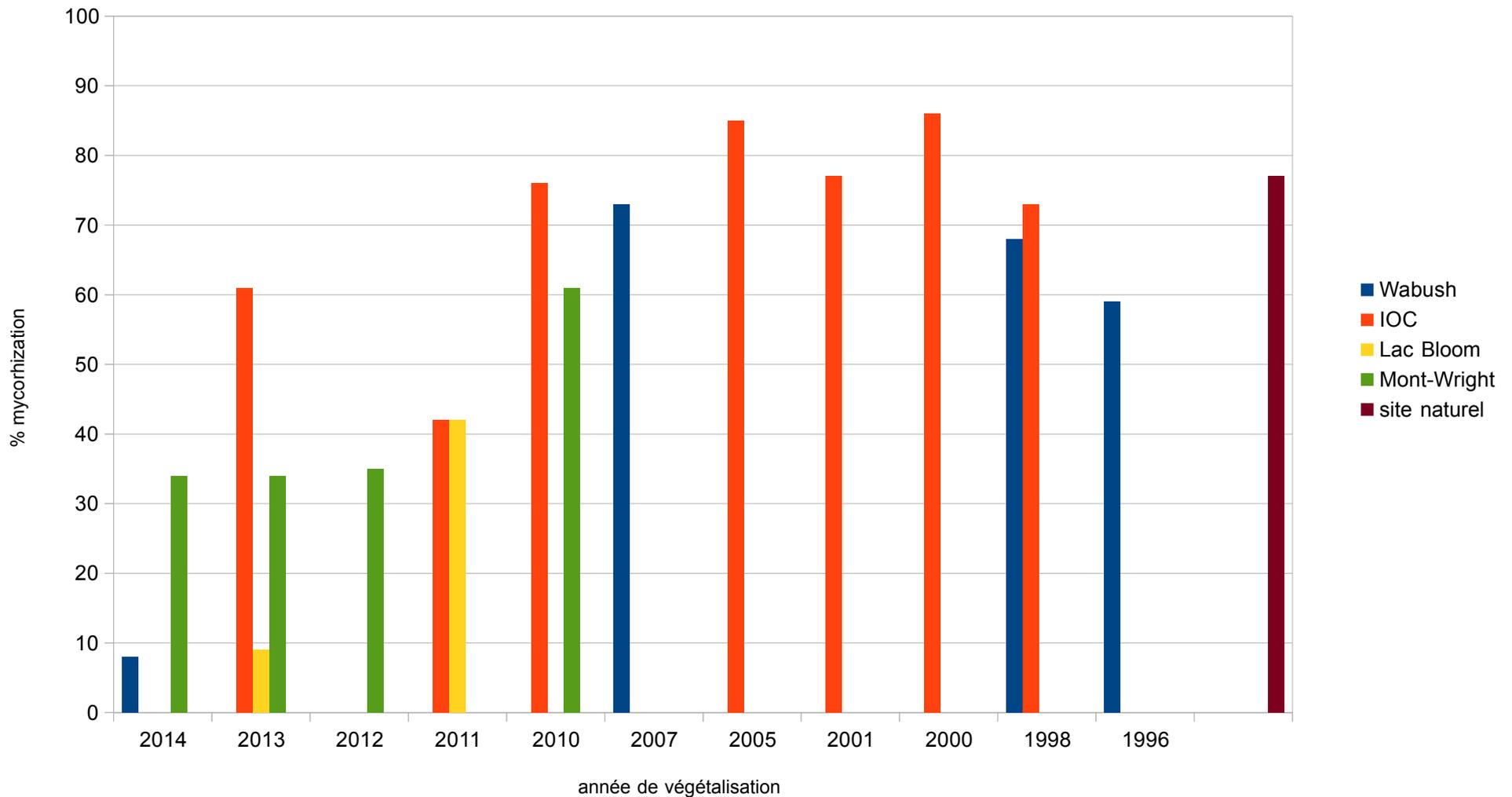
Sur chaque site de résidus miniers en revégétation :

- Prélèvement d'échantillons de plantes représentatives sur plusieurs parcelles végétalisées à des dates différentes : plantes entières + substrat
- Évaluation macroscopique de la nodulation racinaire (symbioses fixatrice d'azote et actinorhizienne)
- Conservation à 4°C des échantillons
- Analyse racinaire au laboratoire pour quantifier la mycorhization racinaire



Résultats: évolution des taux de mycorhization

Évolution de la mycorhization sur les résidus miniers végétalisés



Résultats: cycle de mycorhization nordique selon les espèces

Espèce végétale	Année de végétalisation	% mycorhization juillet 2015	% mycorhization août 2015
<i>Avena sativa</i>	2014	-	-
	2015	-	4
<i>Secale cereale</i>	2014	5	22
	2013	-	-
<i>Phleum pratense</i>	2014	49	36
	2013	29	15
	2011	2	33
	2010	31	45
<i>Festuca rubra</i>	2014	33	23
	2013	17	11
	2012	43	3
	2010	14	49
<i>Festuca eliator</i>	2010, 2012	29	6
<i>Rumex acetosella</i>	2012	60	-
	2010	6	-
<i>Trifolium sp.</i>	2014	24	-
	2010-2013	31	-

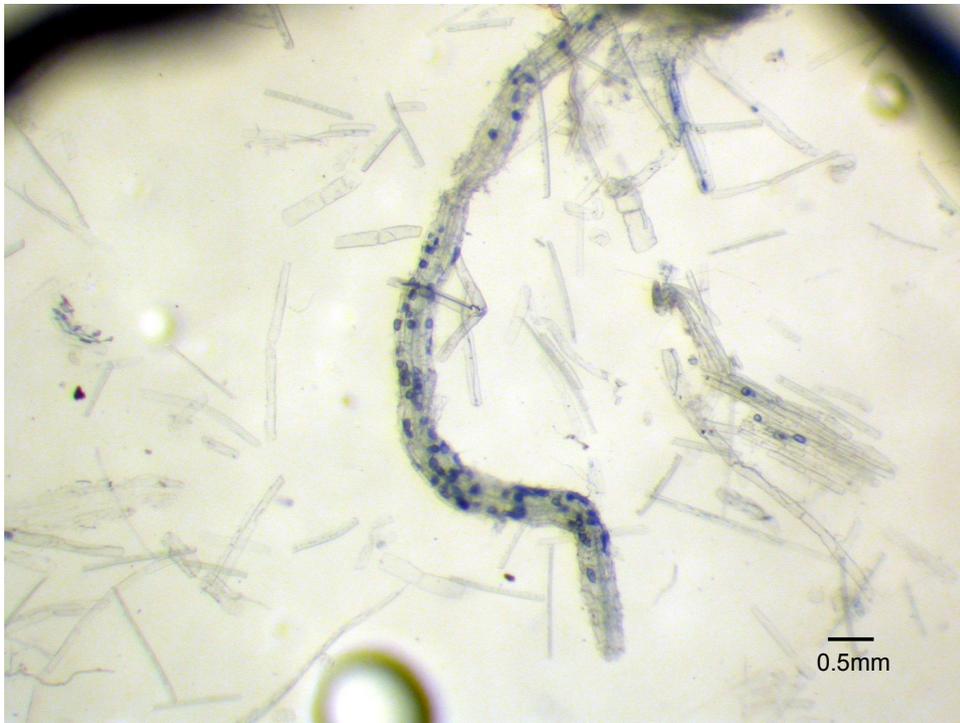


Résultats: cycle de mycorhization nordique selon les espèces

Année de végétalisation	Espèces végétales endomycorhizées	% mycorhization		% hyphes		% arbuscules		% vésicules	
		Juillet	Août	Juillet	Août	Juillet	Août	Juil.	Août
2010	<i>Phleum pratense</i>	31	45	12	0	0	43	20	2
	<i>Festuca rubra</i>	14	49	7	11	4	36	3	13
	<i>Festuca eliator</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Trifolium sp.</i>	23	-	13	-	8	-	2	-
2011	<i>Trifolium repens</i>	48	-	21	-	21	-	6	-
	<i>Trifolium hybridum</i>	30	-	15	-	9	-	7	-
	<i>Phleum pratense</i>	2	33	1	2	1	15	0	16
	<i>Festuca eliator</i>	5	30	0	0	5	11	0	19
2011-12	<i>Festuca rubra</i>	36	-	15	-	13	-	9	-
	<i>Rumex acetosella</i>	60	-	21	-	24	-	15	-
2012	<i>Phleum pratense</i>	36	-	15	-	8	-	13	-
	<i>Festuca rubra</i>	43	3	21	0	15	3	8	0



Résultats: cycle de mycorhization nordique selon les espèces



Festuca rubra, Mont-Wright, juillet 2015



Trifolium pratense, Mont-Wright, juillet 2015



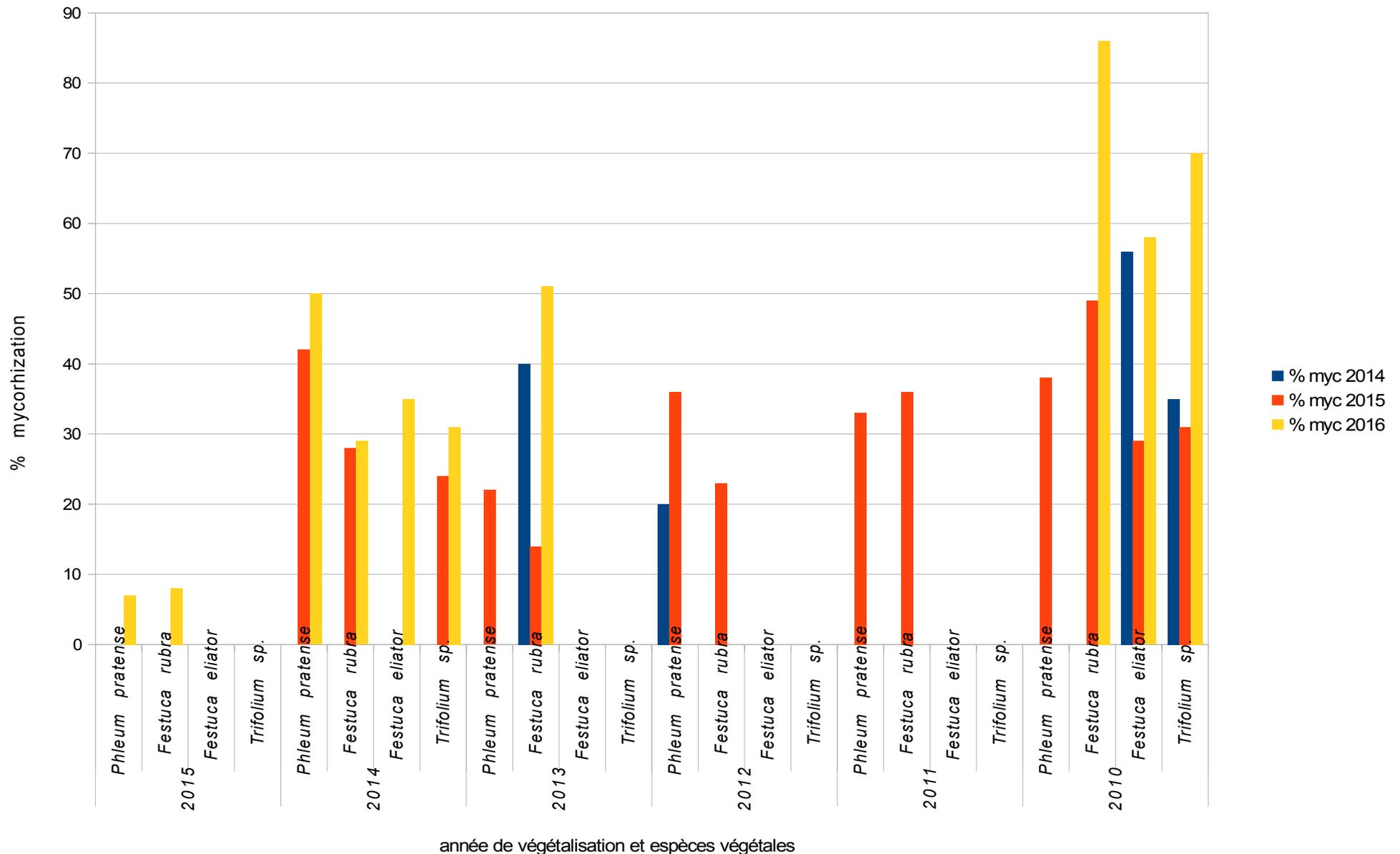
Résultats: progression de la végétation au Mont-Wright

Végétalisation	Espèces végétales	% estimé 2014	% estimé 2015	% estimé 2015	% estimé 2016
2010	<i>Phleum pratense</i>	10	40	20	5
	<i>Festuca rubra</i>	-	90	50	95
	<i>Festuca eliator</i>	70	-	70	-
	<i>Trifolium sp.</i>	5	10	10	5
	autres espèces	2-5	0-5	0	2-5
	mousses	5	5	10	30
2013	<i>Secale cereale</i>	60	0	0	0
	<i>Festuca rubra + eliator</i>	90	50	50	60
	<i>Phleum pratense</i>	5	30	50	10
	<i>Trifolium sp.</i>	95	5	2	30
	<i>Elymus trachicaulus</i>	20	0	0	0
	autres espèces	0	0-5	0-5	0
	champignons saprophytes	5	5	0	0
	mousses	0	5	0	20
2015	<i>Avena sativa</i>	NA	+/-	50	0
	<i>Festuca rubra</i>	NA	+/-	50	50
	<i>Sinapis alba</i>	NA	0	30	0
	<i>Trifolium sp.</i>	NA	+/-	30	0
	<i>Secale cereale</i>	NA	0	0	50-60
	<i>Phleum pratense</i>	NA	0	0	30
2016	<i>Avena sativa</i>	NA	NA	NA	50
	<i>Sinapis alba</i>	NA	NA	NA	2
	<i>Fagopyron esculentum</i>	NA	NA	NA	30
	<i>Secale cereale</i>	NA	NA	NA	+/-

Résultats: évolution des taux de mycorhization

Espèce végétale	Année de végétalisation	% mycorhization août 2014	% mycorhization juil-août 2015	% mycorhization sept. 2016
<i>Avena sativa</i>	2016	NA	NA	0
	2015	NA	4	NA
	2014	17	NA	NA
<i>Secale cereale</i>	2015	NA	NA	7
	2014	NA	22	0
	2013	22	NA	NA
<i>Phleum pratense</i>	2015	NA	-	3
	2014	-	36	50
	2013	-	15	-
	2012	20	36	-
	2011	-	33	-
	2010	-	45	-
<i>Festuca sp.</i>	2015	-	-	8
	2014	-	23	35
	2013	40	11	51
	2012	-	3	-
	2011	-	36	-
	2010	56	49	72
<i>Trifolium sp.</i>	2015	NA	-	-
	2014	-	24	31
	2010-2013	35	31	70

Résultats: évolution des taux de mycorhization selon les espèces



Conclusions: mycorhization des 4 sites miniers végétalisés

Technologie de remise en végétation efficace

- création d'un sol, pérennité de la végétation, nouvelles espèces et successions végétales prendront le relai progressivement

Mycorhization rapide et efficace sans aucun apport d'inoculant

- combinaison gagnante = substrat stérile + amendements organiques

Progression rapide des taux de mycorhization

- Implantation des réseaux d'hyphes souterrains en quelques années

Cycle de mycorhization nordique différentiel selon les espèces

- plusieurs espèces semblent avoir un cycle de mycorhization di-annuel
- 

2ème PARTIE:

PROJET DE FERTILISATION
BIOLOGIQUE DU BLEUET SAUVAGE
Janvier – Juin 2016

Christine Juge, Aïda Azaiez, Damase P. Khasa

Bleuetière
M. Alain Imbeault
Sept-Îles



*Agriculture, Pêcheries
et Alimentation*

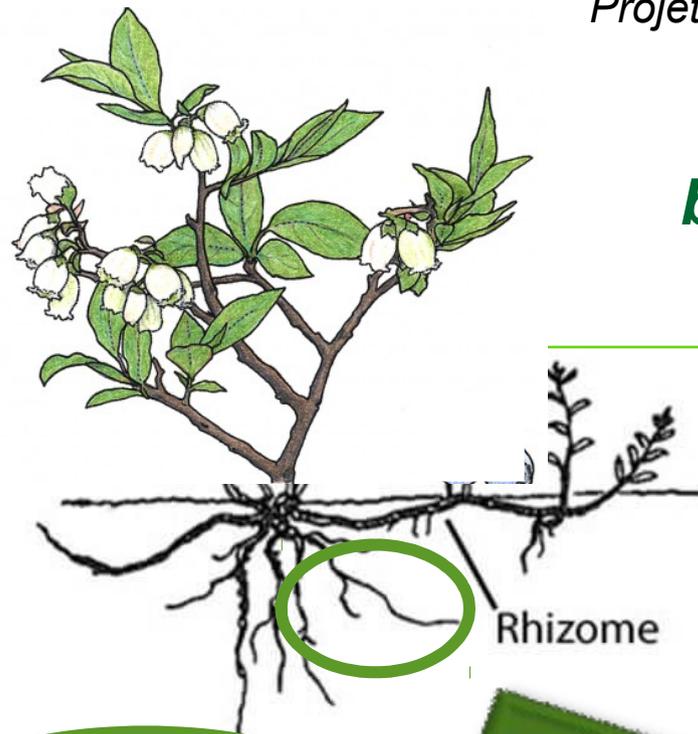
Québec 





Fertilisation Biologique au phosphore de roche

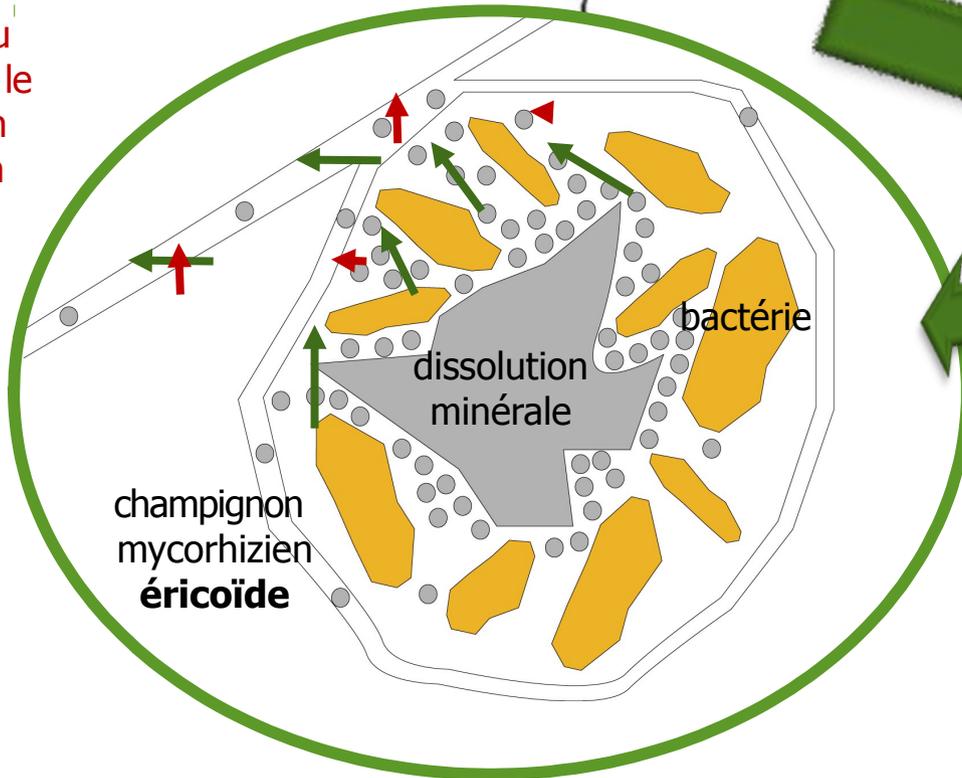
appliquée au bleuet sauvage



Transport du phosphore dans la plante

Rhizome

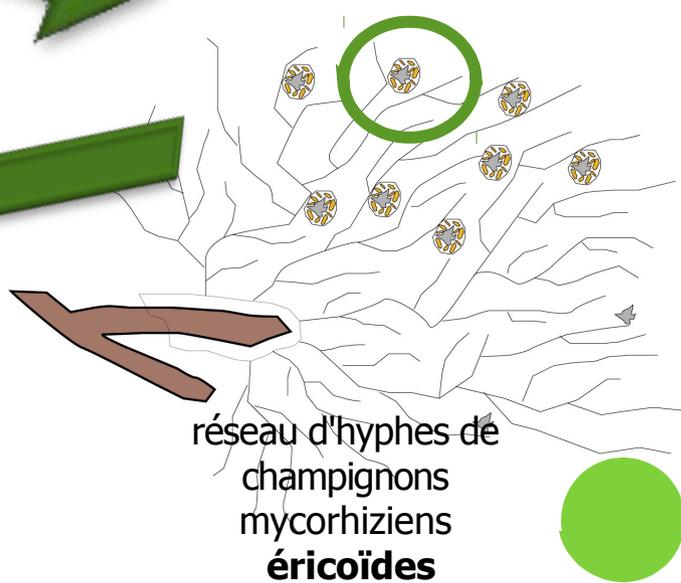
Transport du carbone vers le champignon mycorhizien éricoïde



bactérie

dissolution minérale

champignon mycorhizien éricoïde



réseau d'hyphes de champignons mycorhiziens éricoïdes



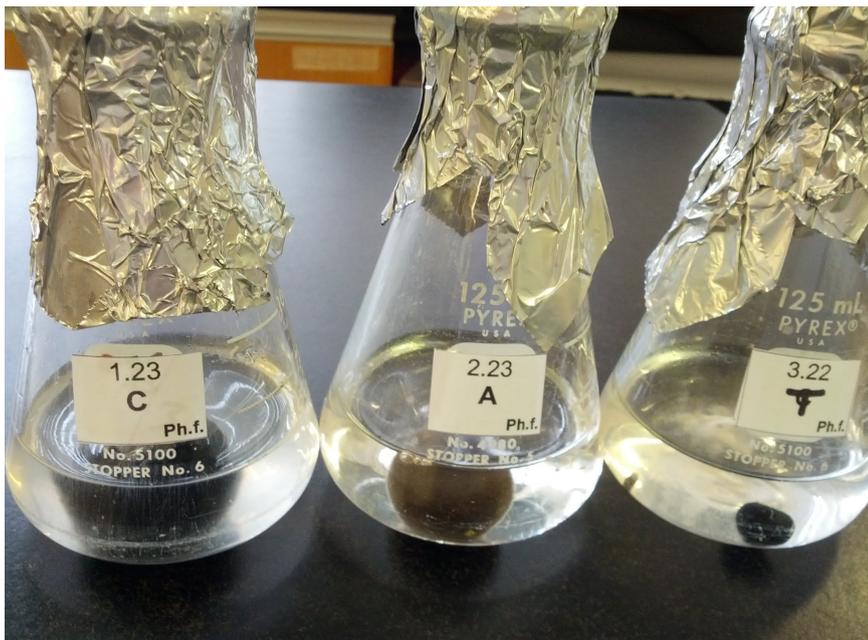


OBJECTIF TRIPLE EN AGRICULTURE

- 1. Utiliser directement l'apatite micronisée sans transformation chimique polluante en engrais phosphatés**
- 2. Remplacer les fertilisants chimiques polluants par une fertilisation biologique**
- 3. Améliorer la santé des sols et des plantes**

1ère étape: Tests de dissolution fongique de l'apatite micronisée de Mine Arnaud par 10 souches de champignons éricoïdes

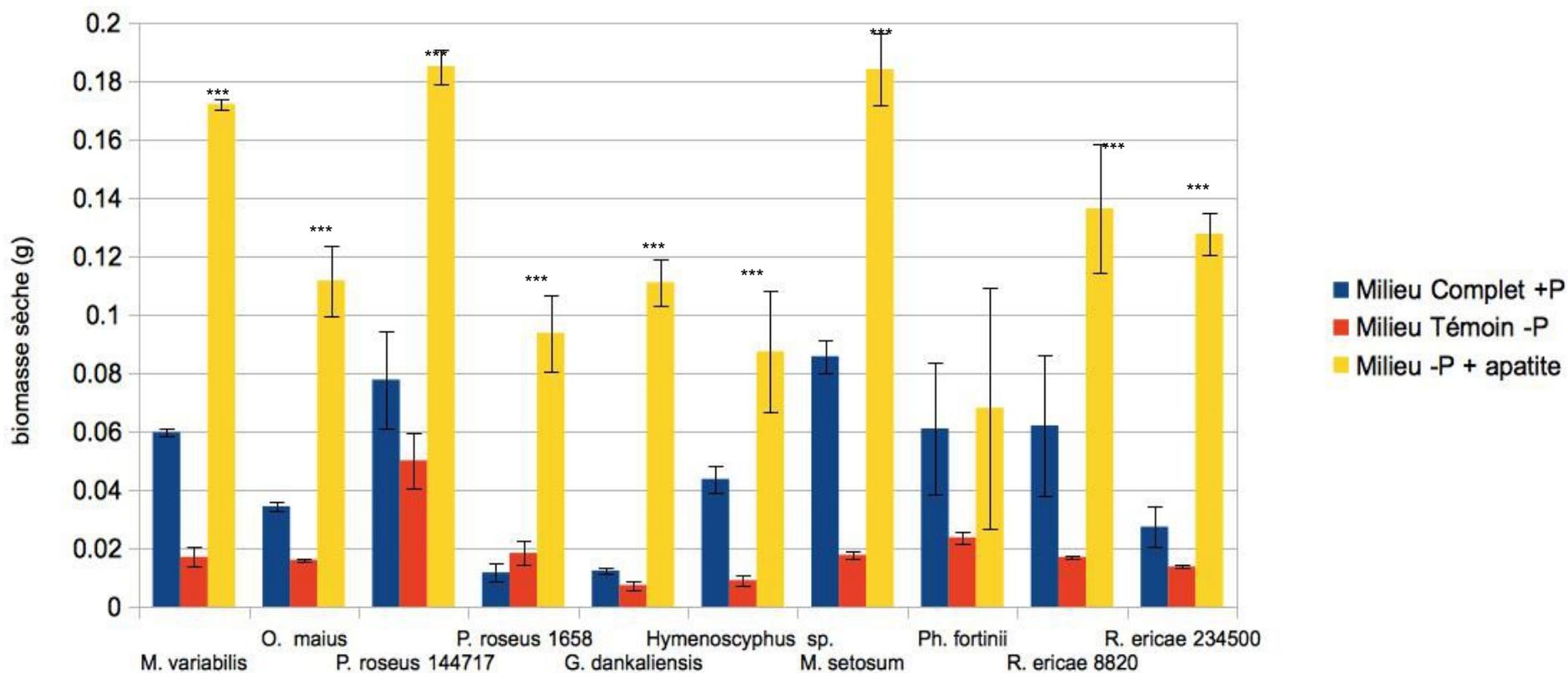
Choix de 8 espèces communément présentes en bleuétière et isolées au Canada



Cultures liquides de *Phialocephala fortinii* (à gauche) et de *Pseudogymnoascus roseus* (à droite) en milieu complet (C), témoin-P (T) et apatite (A) montrant l'utilisation efficace de l'apatite du milieu A



Résultats



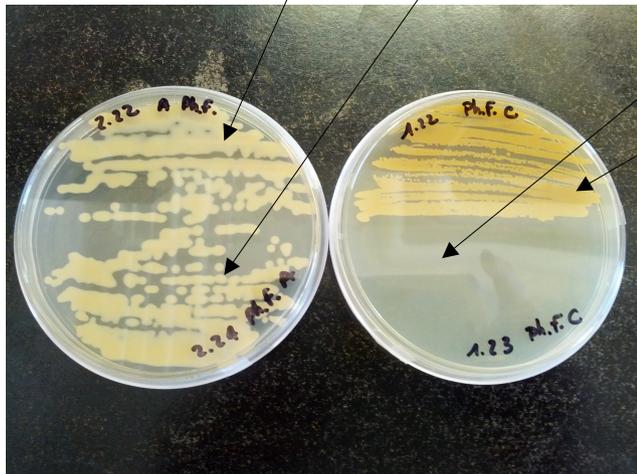
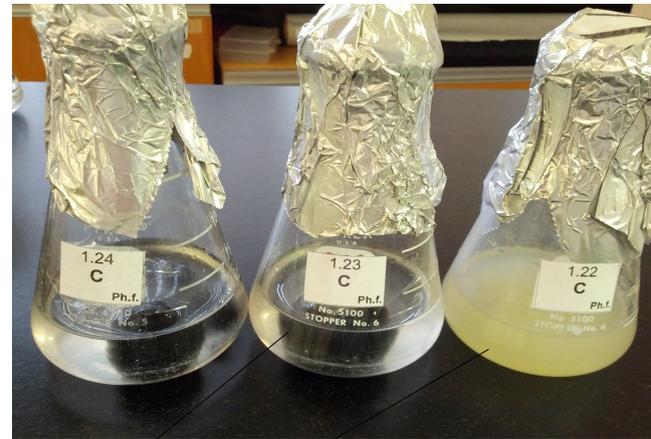
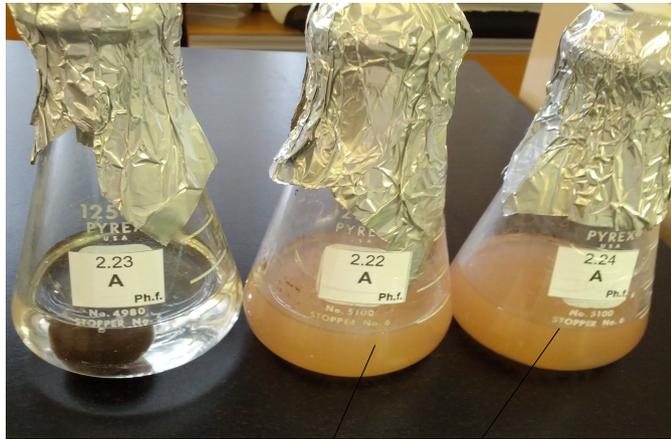


Projet Biofertilisation en bleu tière sauvage

1ère étape: Tests de dissolution fongique de l'apatite micronisée de Mine Arnaud



Résultats



> Identification de colonies isolées:

=> Deux espèces, originellement isolées des sols:
1 Burkholdériale + 1 actinomycète

>> Endosymbiontes des champignons éricoïdes??





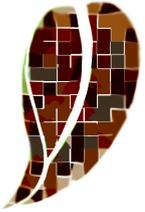
Conclusions

Champignons éricoïdes

(ou complexe champignon – bactérie endosymbiotique)

= très efficaces pour dégrader et utiliser le phosphore de roche





2ème étape:

Essai de biofertilisation au champs – juin 2016

Dispositif expérimental mis en place dans un champ de M. Imbeault:

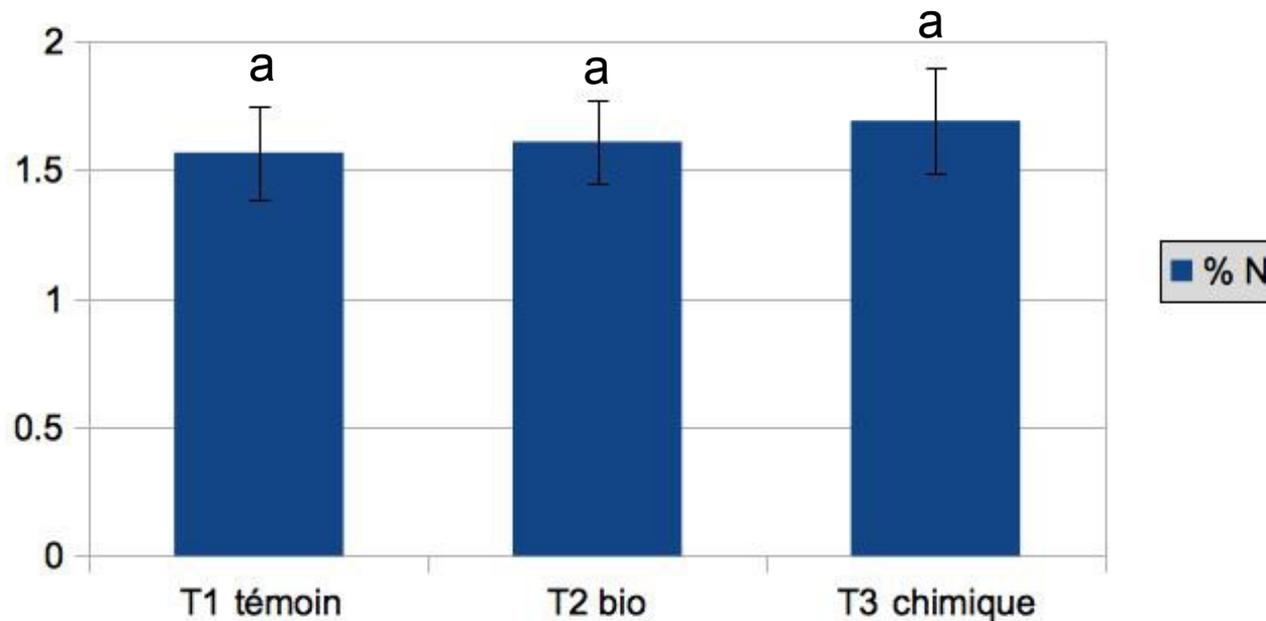
- 3 traitements:
 - T1 : Parcelle témoin: aucun fertilisant appliqué
 - T2 : Fertilisation biologique: 112.5g apatite + 102g urée (52N et 20P)
 - T3 : Fertilisation chimique: 261g de 17.6-6.9-6 (52N et 20P)
- 5 blocs complets aléatoires





Résultats de 1ère année: analyses foliaires des NPK – automne 2016

analyse foliaire de 5 blocs de bleuet sauvage (B1 à B5)



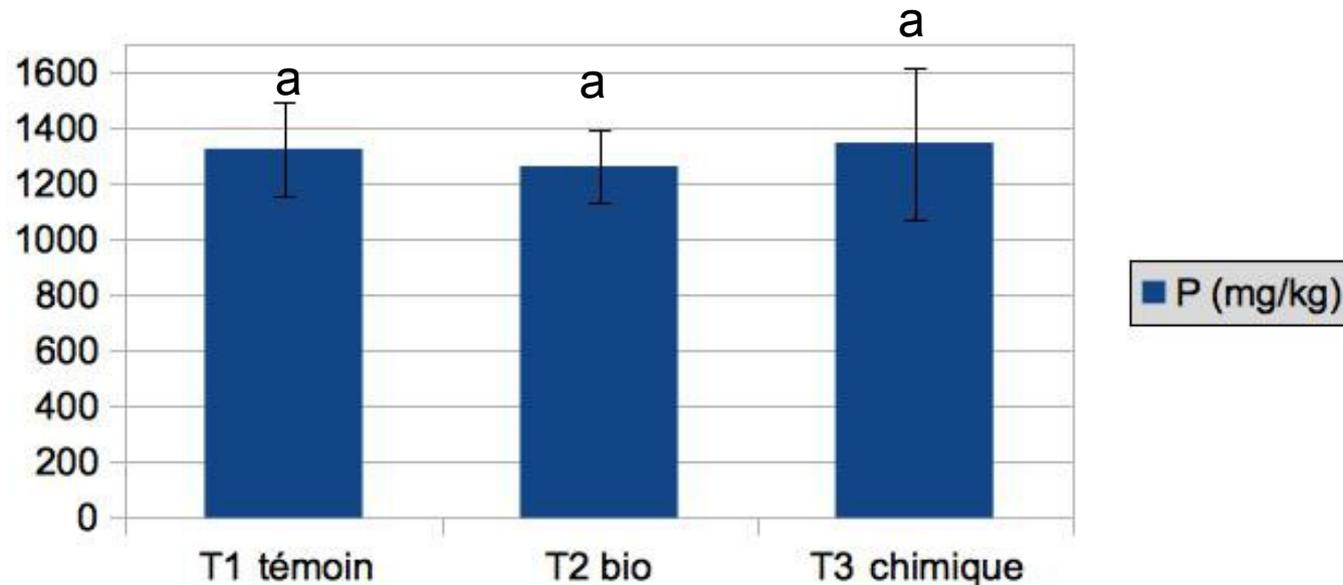
- **Conclusion**: aucune différence significative du [N] foliaire





Résultats de 1ère année: analyses foliaires des NPK – automne 2016

analyse foliaire de 5 blocs de bleuet sauvage (B1 à B5)



analyse foliaire de 5 blocs de bleuet sauvage (B1 à B5)

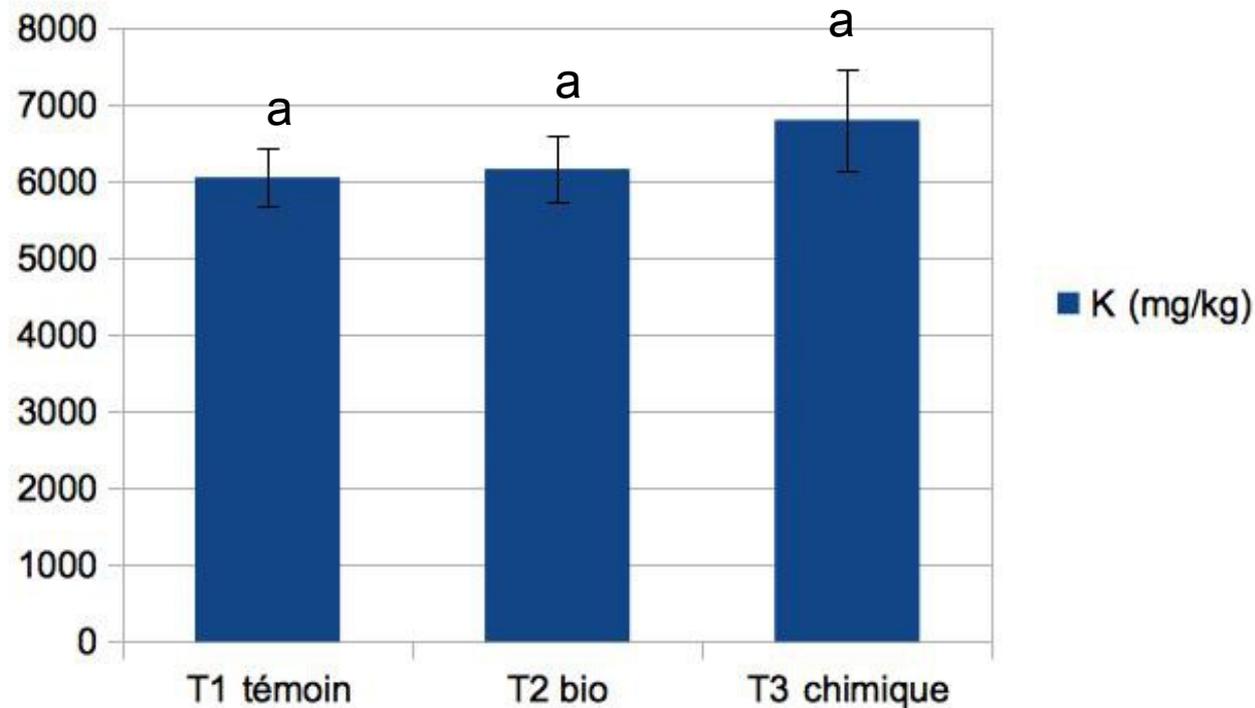
- **Conclusion:** aucune différence significative du [P] foliaire





Résultats 1ère année: analyses foliaires des NPK – automne 2016

analyse foliaire de 3 blocs de bleuet sauvage (B1 à B3)



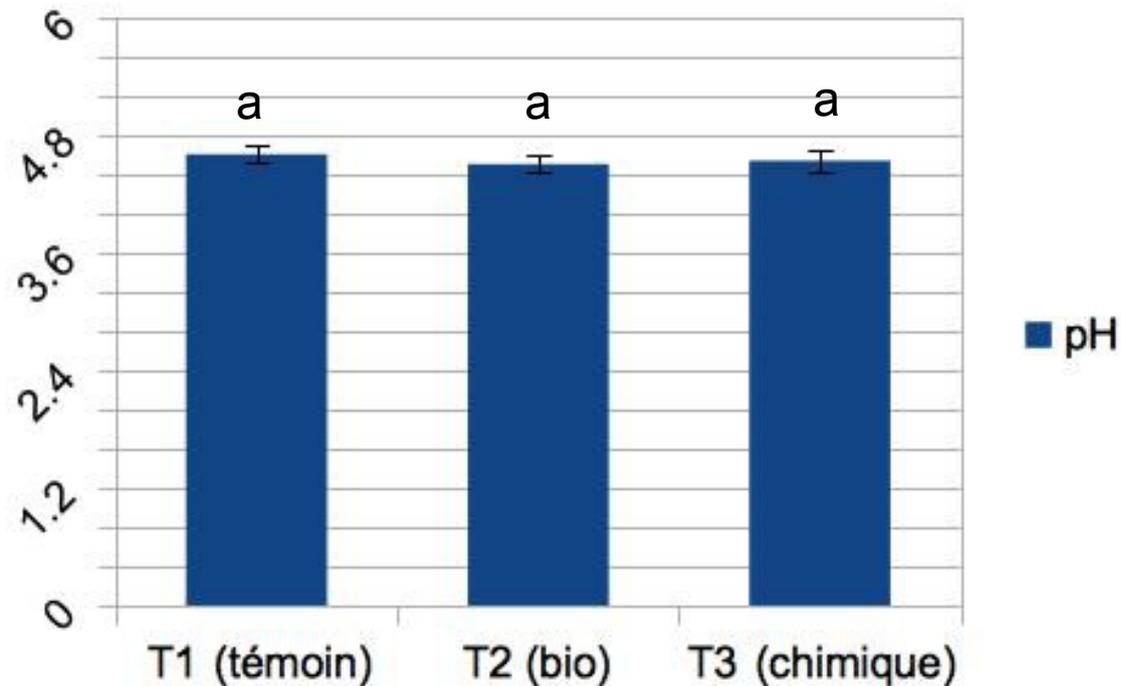
- **Conclusion**: aucune différence significative du [K] foliaire





Résultats de 1ère année: analyses de sol – automne 2016

Caractéristiques chimiques et biologiques



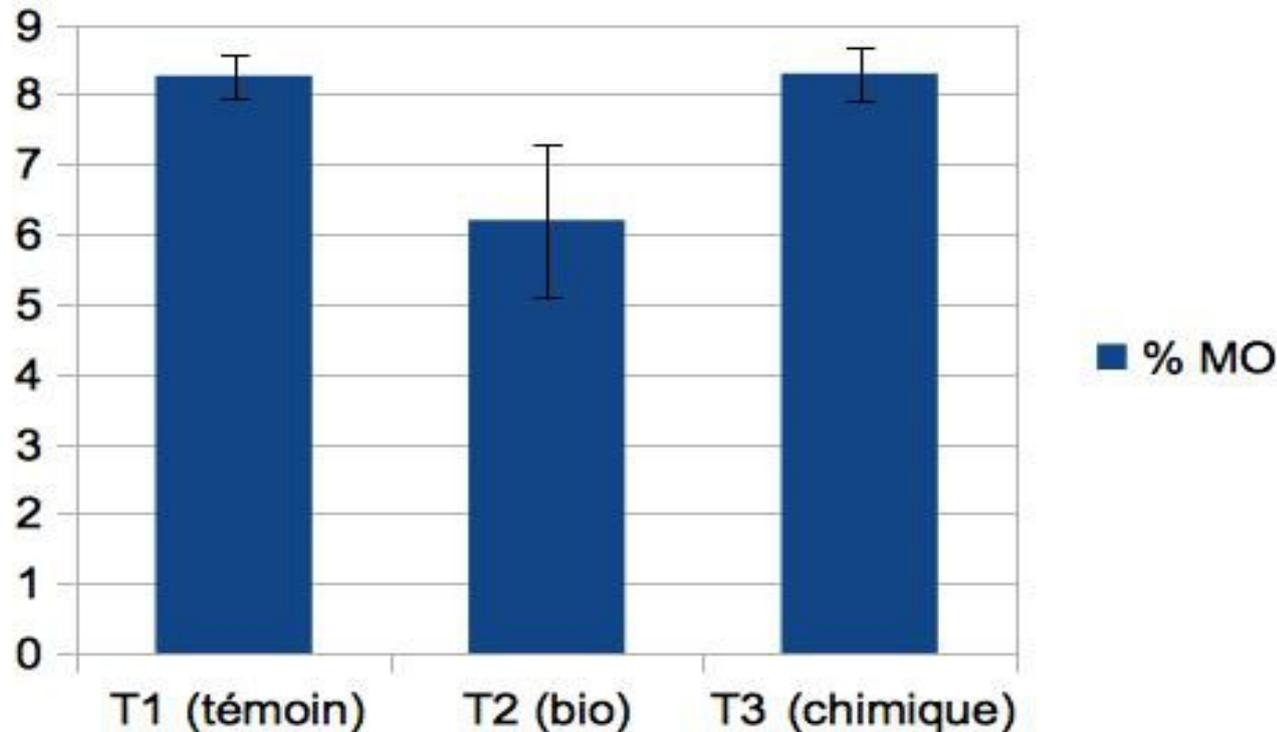
- **Conclusion**: aucune influence du traitement apatite sur le pH du sol





Résultats 1ère année: analyses de sol – automne 2016

Caractéristiques chimiques et biologiques

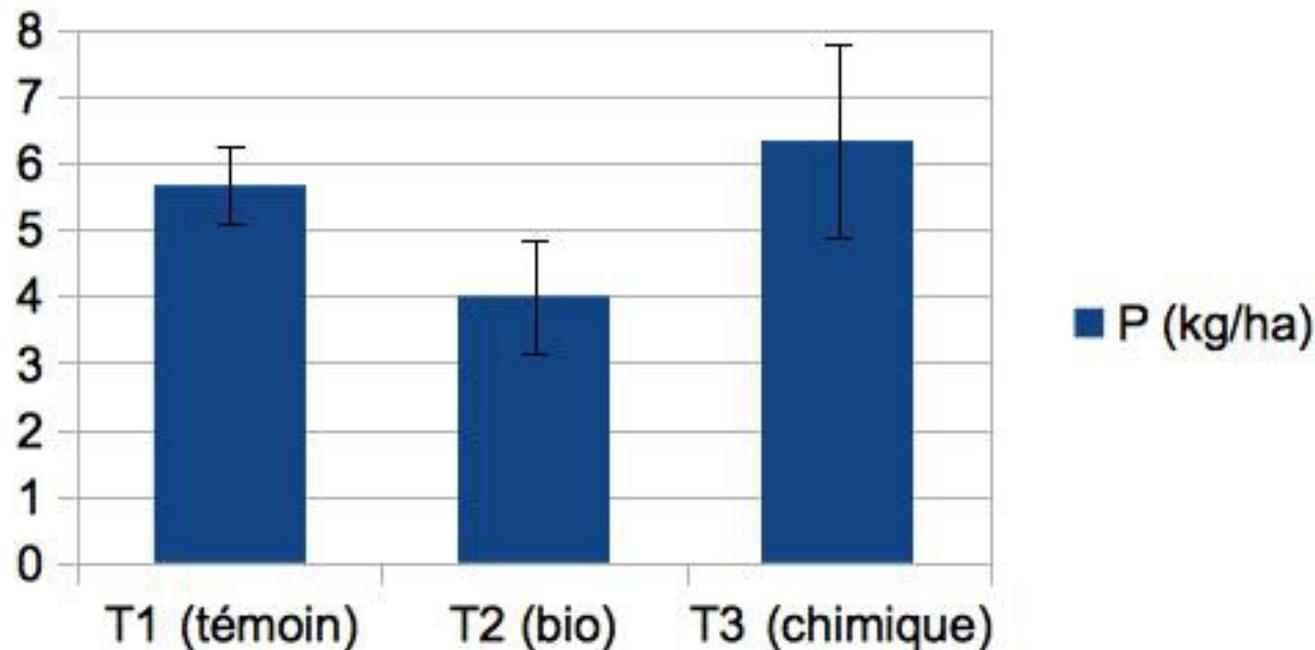


- **Conclusion:** le % MO du sol a tendance à diminuer en présence d'apatite = stimulation de la microflore suite à l'application du fertilisant biologique



Résultats 1ère année: analyses de sol – automne 2016

Concentrations en macro-éléments

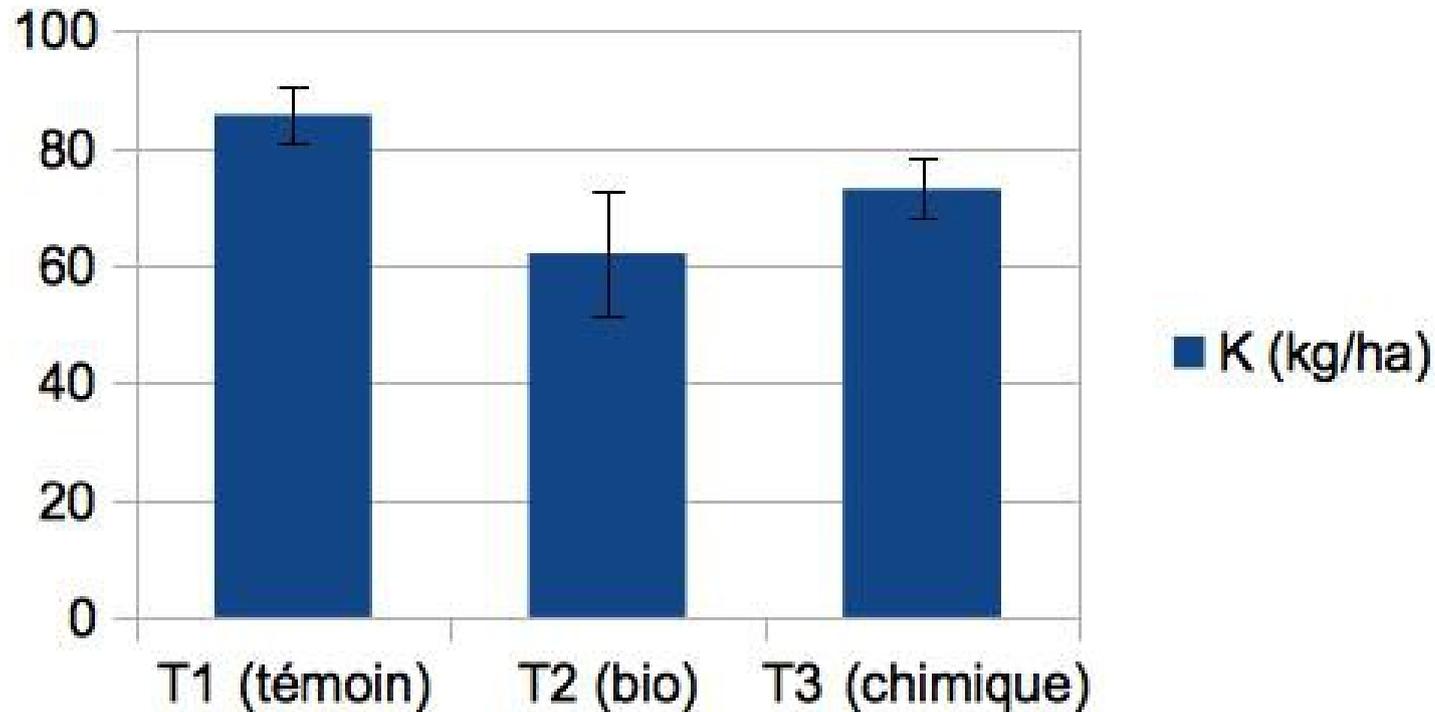


- **Conclusion:** la concentration en P du sol a tendance à diminuer suite au traitement au P de roche, ce qui traduit sa mise en circuit rapide



Résultats 1ère année: analyses de sol – automne 2016

Concentrations en macro-éléments

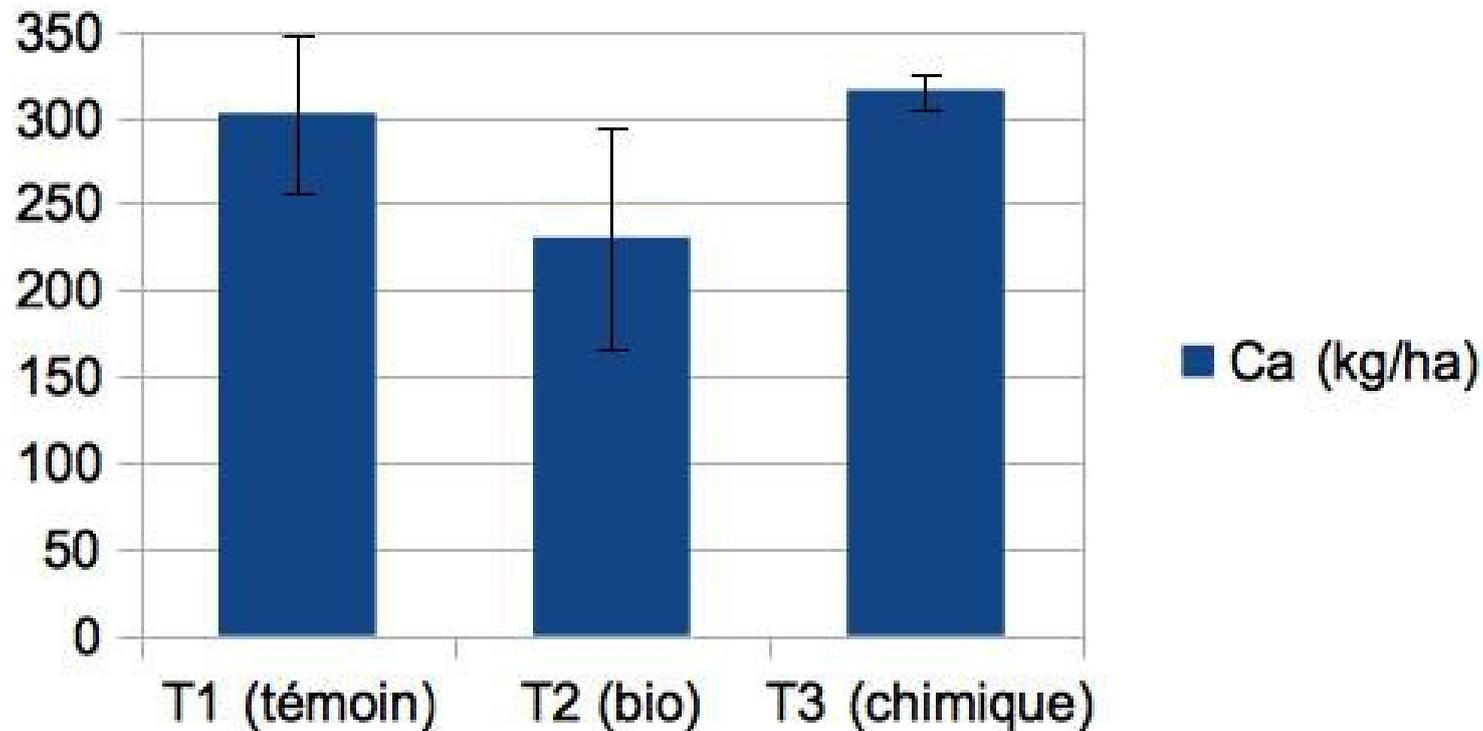


- **Conclusion:** La même tendance à la baisse a été observée pour la concentration en K du sol suite au traitement du biofertilisant phosphoré



Résultats 1ère année: analyses de sol – automne 2016

Concentrations en macro- et micro-éléments



- **Conclusion:** La même tendance à la baisse a été observée pour la concentration en Ca du sol suite au traitement apatite, de même que pour plusieurs microéléments (Fe, Al, Mg)





Conclusions: résultats de 1ère année et suite du projet



- Les analyses de sol de la 1ère année du premier essai au champ ont montré une tendance à la baisse des éléments nutritifs et de la MO du sol suite à l'application du biofertilisant au phosphore de roche, ce qui traduit sa mise en circuit rapide et la stimulation de la microflore
- Aucune modification du pH du sol n'a été observée
- Ces résultats seront complétés à la fin de la saison 2017 par:
 - l'analyse des rendements en bleuets obtenus à l'issue des 2 années de culture
 - le relevé d'indices de croissance et de santé des plants suite à l'application d'apatite micronisée
 - de nouvelles analyses de sol





Conclusions générales : Potentiel de Biofertilisation en bleuetière sauvage

- Les champignons éricoïdes (ou complexes champignon – bactérie endosymbiotique – bactéries du sol) sont très efficaces pour dégrader le phosphore de roche
- Les analyses de sol à l'issue de la 1ère année du premier essai au champ ont montré une mise en circuit rapide du biofertilisant phosphoré
- Une solution de biofertilisation complète pourrait être particulièrement adaptée en bleuetière sauvage grâce à la présence naturelle et à l'efficacité des champignons éricoïdes



MERCI !

Christine Lethielleux-Juge Ph.D.
Consultante Scientifique
Symbioses Racinaires
Mycorhizes & Sols



418-476-2699
christinejd.juge@gmail.com

IRRIGATION **NORCO** INC.



**UNIVERSITÉ
LAVAL**

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec



**Bleuetière
M. Alain Imbeault
Sept-Îles**