INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

REVUE DE LITTÉRATURE

ÉTAT DE SITUATION SUR LE LESSIVAGE DU NITRATE EN PRODUCTION DE POMMES DE TERRE AU QUÉBEC ET AVENUES DE SOLUTIONS

Réalisée par : IRDA

Présentée à : Les Producteurs de pommes de terre du Québec

Date : décembre 2016

Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec

Ce projet a été réalisé grâce au Programme d'appui financier aux regroupements et aux associations de producteurs désignés; Volet C « Appui à la réalisation de projets novateurs et structurants »

www.irda.qc.ca

Table des matières

LISTE DES FIGURES ..... **II**
LISTE DES TABLEAUX ET ANNEXES ..... **II**
1. L'AZOTE ET L'HOMME, UN LIEN SERRE **1**
2. METHODOLOGIE DE LA REVUE DE LITTERATURE **5**
2.1. Recherche d'articles 5
2.2. Procede des entrevues 8
2.3. Resultats de la revue systematique des articles 8
2.4. Resultats des entrevues 8
3. SYNTHESE ET HIERARCHISATION DES STRATEGIES RETENUES **9**
4. FAIRE LE BILAN DES PRATIQUES ET DE L'ETAT DE SANTE GLOBALE DU SOL **12**
5. ADOPTER DES PRATIQUES QUI FAVORISE LA FOURNITURE EN N DU SOL **13**
6. PREDIRE ADEQUATEMENT LA FOURNITURE EN N DU SOL **14**
7. APPORTER LA DOSE OPTIMALE DE N **16**
7.1. Surfertilisation intentionnelle 17
7.2. La dose economique de N (DÉO) 17
7.3. Besoins du cultivar et selection varietale 18
8. AJUSTER ADEQUATEMENT LA DOSE DE N PROVENANT DES FERTILISANTS **19**
8.1 Tests de statut azote du sol 20
8.2 Tests de statut azote de la plante 20
8.2.1 Tests chimiques *21*
8.2.2 Tests optiques *22*
8.2.3 Tests génétiques *24*
8.3 Modelisation du statut azote 24
8.4 Fertilisation de precision 25
9. MAXIMISER LES PRELEVEMENTS DU N APPORTE **26**
9.1 Cibler le bon moment des apports 26
9.1.1 Le fractionnement des apports de N *27*
9.1.2 La fertigation *28*
9.2 Cibler le bon endroit des apports 29
10. MAXIMISER LES PRELEVEMENTS DU N PAR L'IRRIGATION **30**
10.1 Regie raisonnee : declenchement des irrigations 34
10.2 Irrigation de precision 35
10.3 Choix des equipements d'irrigation 36
10.4 Choix du mode d'apport des quantites d'eau 37
11. MAXIMISER LES PRELEVEMENTS DU N PAR LE CHOIX DES ENGRAIS **38**
11.1 Formes : engrais conventionnels 38
11.2 Technologie : engrais a liberation controlee 39
12. MINIMISER LES PERTES DU N RESIDUEL **42**
12.1 Implanter des cultures pieges 42
12.2 Utiliser des inhibiteurs de nitrification 44
12.3 Revoir certaines pratiques agricoles 45
12.4 Amenager les champs adequatement 45
12.5 Tirer profit des modeles de simulation de pertes 46
13. CONCLUSION **46**
14. RÉFÉRENCES **48**

Auteurs :
Mylène Marchand-Roy, agr. M.Sc. - IRDA
Christine Landry, agr. biol. Ph.D. - IRDA
Émilie Larochelle, M.Sc. - IRDA
Carl Boivin, agr. M.Sc. - IRDA

Responsables scientifiques :
Volet fertilisation : Christine Landry, agr. biol. Ph.D. - IRDA
Volet irrigation : Carl Boivin, agr. M.Sc. - IRDA

Membre du comité consultatif :
Marie-Pascale Beaudoin, agr. - conseillère horticole, MAPAQ, Direction régionale du Saguenay - Lac-Saint-Jean
Annie Berger, agr. - économiste, Les Producteurs de pommes de terre du Québec
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - conseiller horticole, MAPAQ, Direction régionale de la Capitale-Nationale
Mélissa Gagnon, agr. - conseillère horticole, MAPAQ, Direction régionale de Montréal-Laval-Lanaudière
Guillaume Deschênes, agr. - conseiller horticole, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction régionale de Montréal-Laval-Lanaudière
Isabelle Giroux, M.Sc. - géographe, responsable du suivi environnemental des pesticides, MDDELCC, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Service de l'information sur les milieux aquatiques
Bruno Gosselin - coordonnateur du Réseau d'avertissements phytosanitaires, MAPAQ, Direction de la phytoprotection
Joëlle Ouellet, agr. - conseillère horticole et inspectrice pommes de terre, MAPAQ, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent
Stéphane Perreault, agr. - conseiller spécialisé pommes de terre, La Coop Fédérée
Guy Roy, agr. - expert horticole, Synagri
Patrice Thibault, agr. - conseiller agricole, Réseau de lutte intégrée de l'Île d'Orléans

Coordination
Denise Bachand, M.Sc. - chargée de projets, CRAAQ.

Demandeur
Les Producteurs de pommes de terre du Québec.

Financement
Ce projet a été réalisé grâce au Programme d'appui financier aux regroupements et aux associations de producteurs désignés; Volet C « Appui à la réalisation de projets novateurs et structurants »

Note
Ce projet est une initiative du sous-comité agroenvironnement du Comité pomme de terre du CRAAQ. Remerciement spécial à madame Laure Boulet.

Liste des figures

Figure 1. Cascade des phénomènes découlant de la fabrication industrielle d'azote réactif……2

Figure 2. Relation conceptuelle entre les rendements en pommes de terre, le nitrate résiduel et les apports de fertilisants N……18

Figure 3. Taux d'utilisation azoté à la récolte (100 % des prélèvements de la saison complétés) (2007-2013) et rendements vendables pour des cultivars de Goldrush, Norland et Russet Burbank et Nodora soumis à une régie d'irrigation raisonnée ou non-irriguée……32

Figure 4. Taux d'utilisation azoté au stade floraison (50 % des prélèvements de la saison complétés) (2007-2013) et rendements vendables pour des cultivars de Goldrush, Norland et Russet Burbank soumis à une régie d'irrigation raisonnée ou non-irriguée. ……32

Figure 5. Teneurs en NO_3-N dans l'eau des lysimètres selon la consigne d'irrigation (réserve en eau utile (RU) de 65 % ou 50 %) pour le cultivar Norland en 2010……33

Figure 6. Teneurs en NO_3-N dans l'eau des lysimètres selon la consigne d'irrigation (réserve en eau utile (RU) de 65 % ou 50 %) pour le cultivar Russet B. en 2010……34

Figure 7. Comparaison de la dynamique des nitrates au travers du profil de sol entre des saisons avec précipitations faibles (2007) ou importantes (2008), dans un sol (sable loameux) cultivé en pommes de terre (cv. Goldrush) et irrigué de façon raisonnée à Deschambault, Québec……40

Liste des tableaux et annexes

Tableau 1. Liste des critères d'inclusion pour la sélection des articles scientifiques……5

Tableau 2. Liste des critères de pertinence pour la sélection d'articles scientifiques……6

Tableau 3. Évaluation de la validité des articles scientifiques retenus……7

Tableau 4. Évaluation générale des articles scientifiques……8

Tableau 5. Schéma de hiérarchisation des solutions proposées pour limiter les pertes par lessivage……10

Annexe 1. Liste des intervenants interrogés……69

1. L'azote et l'homme, un lien serré

L'azote (N) est l'élément clé du rendement de nos agrosystèmes. Toutefois, bien que très présent dans notre environnement, il n'est que peu disponible aux cultures, puisque la majorité de cet élément se retrouve sous forme de N_2 inerte dans l'air. Ainsi, seul le N dit réactif (ammoniaque (NH_3) et ammonium (NH_4^+), oxyde nitreux (NO), dioxyde d'azote (NO_2), nitrate (NO_3^-) et nitrite (NO_2^-)) est profitable aux cultures. Outre le processus de fixation biologique du N atmosphérique (N_2), ces formes proviennent de la production d'engrais azoté minéral (Follet et Hatfield 2001). La fertilisation azotée des cultures est donc nécessaire puisque les sources naturelles de N assimilables dans les sols sont insuffisantes pour soutenir les besoins azotés des cultures. En fait, depuis le début du 21ème siècle, la moitié de la population mondiale dépend pour se nourrir des apports azotés découlant du procédé industriel de fabrication des engrais Haber-Bosh (Erisman et coll. 2008). Le véritable défi n'est donc pas de tenter d'éliminer la fertilisation azotée, mais de gérer de façon intégrée les apports. La fixation par l'homme du N (fabrication des engrais) étant plus du double de celle des processus naturels (Fowler et coll. 2013), mal contenue, celle-ci vient altérer substantiellement les flux azotés des écosystèmes. Une méta-analyse récente de 206 articles scientifiques (Lu et coll. 2013) a révélé que les effets les plus marquants de l'utilisation des engrais étaient, de loin, l'augmentation de la concentration des sols en nitrate (NO_3) (429%) et l'accroissement de son lessivage au travers du profil de sol (461 %). Suivait, dans une moindre mesure, une hausse dans les sols des processus de nitrification (production de nitrates) (154 %), d'émissions d'oxyde nitreux (NOx) (134 %) et de dénitrification (reconversion du N réactif en N_2 gazeux) (84 %).

Ainsi, par la fertilisation, malgré un accroissement marqué de la biomasse agricole, dans laquelle davantage de N se retrouve fixé, l'augmentation simultanée et très importante du lessivage du NO_3 résulte en une surfertilisation azotée non intentionnelle hors des systèmes agricoles et en la contamination des eaux souterraines et de surface (Jiang et coll. 2011; Lu et coll. 2013; Zebarth et coll. 2015). L'un des plus longs suivis de qualité d'eau (140 ans), celui du bassin versant de la Tamise en Grande-Bretagne, illustre bien cette réalité. Si avant l'intensification de l'agriculture (vers 1940), les concentrations en NO_3 des cours d'eau étaient stables à 1-2 mg NO_3-N/L, elles sont maintenant de 6-8 mg NO_3-N/L (Howden et coll. 2011). De même, au Canada, si les concentrations en nitrate des cours d'eau étaient demeurées assez stables entre 1981 et 1996 (3,7-4,5 mg NO_3-N /L), celles-ci se sont accrues fortement pour atteindre 5,7 mg NO_3-N /L en 2001. En parallèle, 18 % des 80 % de terres agricoles désignées à très faible/faible risque de contamination par le NO_3 avant 2001 sont dorénavant classées à risque supérieur, avec plus de un million d'hectares à risque élevé se trouvant concentrés au Manitoba, à l'Île-du-Prince-Édouard, dans le sud et l'est de l'Ontario et au Québec (De Jong et coll. 2006).

La contamination de l'eau en NO_3 provoque à son tour une cascade de phénomènes, dont la prolifération d'algues nocives menant à l'eutrophisation des eaux de surface et à la contamination de l'eau potable (Fig. 1) (Sutton et coll. 2011). Incidemment, elle a des

conséquences sérieuses sur les communautés. Par exemple sur la santé, telle la méthémoglobinémie (*syndrome du bébé bleu*) chez les enfants et une hausse du risque des cancers gastriques et intestinaux chez les adultes (Subhash et coll. 2011) ou, sur la perte de lieux de loisirs et de valeur des propriétés riveraines concernées. Les autorités de plusieurs pays ont ainsi légiféré sur la teneur maximale acceptable en nitrate des eaux. En Europe, la Directive Nitrate fixe une concentration de 11,3 mg NO_3-N/L (50 mg NO_3/L) comme limite maximale pour l'eau potable (Dunn et coll. 2012). Aux États-Unis, l'Agence de protection environnementale la fixe à 10 mg NO_3-N/L (Kros 1993), tout comme le Québec dans son Règlement sur la qualité de l'eau potable.

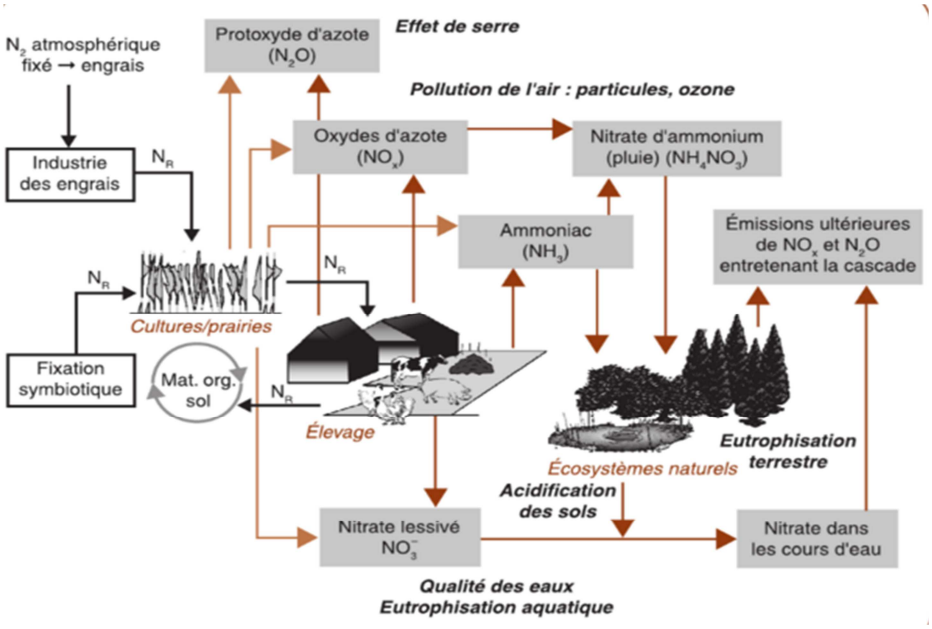

Figure 1. Cascade des phénomènes découlant de la fabrication industrielle d'azote réactif (Adapté de Sutton et coll. 2011)

Le Québec n'échappe donc pas à cette problématique qui est accentuée lorsque la production agricole combine une culture exigeante en N et des sols aux caractéristiques favorisant le lessivage. Ce qui est le cas de la culture de la pomme de terre qui se pratique majoritairement en sols sableux. La situation est d'autant plus marquée que cette production est, d'une part, très importante au Québec et qu'elle se retrouve concentrée dans quelques régions seulement. Ainsi, bien que la province de Québec se retrouve au premier rang du volume des ventes de légumes frais (526 000 t/an ; > 145 millions de dollars), ce marché n'est issu que de 567 exploitations agricoles, réparties sur 17 300 ha de terres (ISQ 2016), concentrées dans seulement quatre régions (Capitale-Nationale - Côte-Nord (23%), Lanaudière (22%) et Saguenay-Lac-Saint-Jean (16%) et la Montérégie (10%) (MAPAQ 2014). Considérant un taux moyen de fertilisation de 175 kg N/ha, environ 3 M kg de N sont ainsi appliqués annuellement sur une superficie relativement restreinte, ouvrant la porte à des pertes entre 2,1 et 1,2 M kg de N. Sous les conditions de sol et de climat du Québec, des taux d'utilisation du N (TUN) plutôt faibles sont

en effet la norme. Généralement, un TUN au mieux de 60 %, en moyenne de 45 % et pouvant s'abaisser dans les 30 % lors de mauvaises saisons climatiques ou en présence de pratiques agricoles inadéquates est reconnu pour la pomme de terre (Ziadi et coll. 2007; Vos 2009). Huit années de travaux menés à l'IRDA, spécifiquement sur le TUN des engrais et le lessivage du NO_3 selon la gestion de l'eau et du N dans la culture de la pomme de terre ont d'ailleurs confirmé la part importante de N non prélevé (20% à 80 %), même sous de bonnes conditions (Boivin et Landry 2011; 2012; Landry et Boivin 2013; 2014a). Le Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2010) tient d'ailleurs compte de cette réalité et doit recommander des doses supérieures à celles prélevées par la culture afin de s'assurer d'un prélèvement adéquat. Un second calcul rapide illustre cette réalité. Selon les valeurs références de prélèvement en N pour la pomme de terre (3,7 kg N/T de tubercules) (CRAAQ 2010) et les valeurs moyennes 2010-2015 de superficies (17 300 ha) de production et de rendement (526 000 T/an) (ISQ 2016), au taux moyen de fertilisation de 175 kg N/ha, 1 946 200 kg de N seront exportés par la récolte de tubercules du site de production sur les 3 027 500 kg de N appliqués, soit un ratio de 64%. Une portion du N des engrais sera aussi prélevée par les fanes en cours de saison, mais une partie de ce N sera transloquée aux tubercules avant la récolte et le restant retournera au sol lors du défanage.

La plante en elle-même, de par sa nature, rehausse la problématique mentionnée. Celle-ci a, d'une part, des besoins élevés en N, mais d'autre part, un système racinaire limité, superficiel et fibreux, peu efficace à prélever cet élément (Peralta et Stockle 2002; Munoz et coll. 2005). Le lessivage du NO_3 à partir de la zone racinaire de la pomme de terre est ainsi, par exemple, deux fois plus important que celui pour l'orge (Delgado et coll. 2001). De plus, la pomme de terre préfère l'ion nitrate à l'ion ammonium comme source de N (Cao et Tibbits 1993), soit la forme la plus à risque d'être lessivée (Munoz et coll. 2005). L'ion NO_3^- est en effet très soluble et mobile dans les sols puisqu'il est repoussé par le complexe argilo-humique. Il est ainsi facilement et rapidement lessivé au travers du profil du sol (Keeney 1983) puisque son mouvement est régi à 99% par le transport convectif de l'eau (Tisdale et coll. 1985). Ce phénomène est d'autant plus accentué dans les sols sableux, plus perméables à l'infiltration de l'eau que les sols à texture fine (Giroux et Sarrasin 2011) et il s'avère que c'est dans ce type de sol que la culture de la pomme de terre s'adapte le mieux. En plus, puisque les sols sableux fournissent peu de N, celui-ci devient le nutriment le plus limitant (Errebhi et coll. 1998; Munoz et coll. 2005) et la culture exige des apports conséquents.

La régie de culture participe aussi à la situation. Le travail répété du sol et le type de rotation font en sorte qu'une majorité des sols à pomme de terre présentent une forte déperdition de matière organique (MO) qui entraîne à son tour un faible taux de minéralisation et donc de production de NO_3. La régie usuelle laisse également souvent des quantités importantes de NO_3 résiduel post-récolte. Dans les climats humides comme au Québec, il a été prouvé qu'il y a un lien direct entre ces concentrations et le risque de lessivage (Roth et Fox 1990; Bélanger et coll. 2003). Enfin, de plus en plus de superficies en pomme de terre se retrouvent dorénavant sous irrigation. Au cours des quinze dernières années au Québec, au moins 3000 ha de terres

supplémentaires, pour un total de 6400 ha en production de pommes de terre, se sont retrouvées sous irrigation pour soutenir les besoins en eau de cette culture (Boivin et Bergeron 2015) qui n'est d'ailleurs pas plus efficace pour prélever l'eau que le N (Boivin et Landry 2011). Hors, lorsque l'irrigation ne fait pas l'objet d'une gestion raisonnée, la récupération du N y est encore plus faible et le lessivage élevé, comme le démontrent les faibles concentrations en NO_3 encore présentes à la récolte (Zvomuya et coll. 2003; Landry et Boivin 2014a) à cause d'un lessivage accru pendant la saison de croissance.

En résumé, les régions à forte production de pommes de terres sont largement reconnues comme source de transfert du NO_3 vers les eaux (Milburn et coll. 1990; Honisch et coll. 2002; Munoz et coll. 2005). À l'Île-du-Prince-Édouard (Î.-P.-É.), plus petite province canadienne mais 4ième plus importante productrice de pommes de terre, il s'agit d'une problématique majeure aux yeux de la Commission sur le nitrate dans les eaux souterraines de l'Î-P.-É. (Jiang et coll. 2011). Au Québec, les résultats d'une vaste campagne d'échantillonnage menée en 2008-2009 par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) vont dans le même sens. Ils indiquent que 40% des puits en régions productrices de pommes de terre ont des teneurs en NO_3 supérieures à la norme d'eau potable, tel que déjà mesuré en 1999-2001 (Giroux et Sarrasin 2011). Devant l'importance du problème, ***une nouvelle campagne d'échantillonnage est prévue dans les puits de ces régions en 2017 pour suivre l'évolution des contaminations*** (Giroux 2016 [comm. pers.]). Le Sous-comité environnement du Comité CRAAQ pommes de terre a d'ailleurs été mis sur pied suivant le constat du MDDELCC. Les pertes de NO_3 et de rendement qui leur sont associées demeurent aussi une grande préoccupation pour les producteurs. À ce jour, il n'est effectivement toujours pas possible pour eux de déterminer les quantités de N perdues et de les compenser. À un certain stade de croissance, il n'est de toute façon plus possible de retourner en appliquer. La variabilité des rendements due au lessivage entraîne donc d'importantes baisses de rentabilité pour les entreprises. Une perte de seulement 5,6 t/ha de pommes de terre diminue en effet les revenus de 1 200$/ha, ce qui est énorme à l'échelle de la ferme et atteint une perte de 21 M$ pour les 17 300 ha en production au Québec. Le syndicat (Les Producteurs de pommes de terre du Québec (PPTQ)) considère ainsi toujours comme une priorité de recherche la diminution du lessivage du NO_3 (PPTQ 2015) puisque l'application en bandes et le fractionnement des engrais n'ont pas été des solutions suffisantes pour contrer le haut taux de perte du N dans cette culture. Le lessivage du NO_3 est effectivement encore et toujours le principal mécanisme par lequel se perd le N en production de pommes de terre (Zebarth et Rosen 2007). Le syndicat a donc mandaté l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), en collaboration avec le Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), pour réaliser une revue de littérature s'appuyant sur les dernières connaissances scientifiques d'ici et d'ailleurs qui présente les solutions potentielles existantes applicables en contexte québécois pour améliorer la gestion du N et ainsi réduire la perte de nitrate.

2. Méthodologie de la revue de littérature

La revue de littérature a été réalisée suivant une approche adaptée du National Institute for Health and Clinical Excellence du Royaume-Uni (NICE 2009). Cette approche permet de trouver, mais surtout de conserver objectivement les articles scientifiques les plus pertinents à consulter. De plus, afin de bien faire ressortir la situation spécifique du milieu agricole québécois et de bénéficier de l'expertise des différents acteurs du milieu, une série d'entrevues d'environ une heure chacune a été effectuée auprès de plusieurs experts de la production de pommes de terre, reconnus du milieu québécois (producteurs, conseillers agricoles, représentants, chercheurs, conseillers du MAPAQ et du MDDELCC). La liste des intervenants consultés et leur affiliation est présentée à l'annexe 1.

2.1. Recherche d'articles

La recherche d'articles s'est effectuée en cinq étapes. La première étape consistait à établir une question de recherche précise et concise. Dans le cas de la présente revue, la question approuvée par le comité consultatif (annexe 2) était la suivante : «Quelles sont les meilleures pratiques agronomiques à adopter pour minimiser le lessivage du nitrate en contexte de production de pommes de terre au Québec?». Par la suite, un ensemble d'articles permettant d'obtenir de l'information à ce sujet a été méticuleusement sélectionné grâce au processus de revue systématique des documents expliqué ci-dessous. Trois moteurs de recherche ont été sélectionnés pour effectuer la recherche, soit Cab Abstracts, Google Scholar et Web of Science. Pour chacun de ces moteurs, tous les articles scientifiques répondant aux mots clés « irrigation, nitrogen, potato; nitrate, leaching; nitrate, leaching, potato; nitrate leaching, Canada; nitrate, irrigation, potato et water pollution, potato» et rédigés postérieurement à 1984 ont été recensés. Des bases de données françaises, comme les publications IRDA (exemple Agrosol), Agri-réseau ou Arvalis ont également été consultées. Parmi tous ces articles, seuls ceux dont le titre ou les mots clés se retrouvant dans le résumé permettaient de répondre à l'un ou l'autre des critères d'inclusion décrits au Tableau 1 ont été retenus pour le processus d'évaluation.

Tableau 1 : Liste des critères d'inclusion pour la sélection des articles scientifiques.

Pratiques agronomiques applicables à la ferme
Réduction du lessivage du nitrate
Pratiques agronomiques applicables au Québec dans le contexte de production de la pomme de terre

Lors de la troisième étape, les articles retenus à l'étape 2 ont tous été évalués de nouveau afin de ne conserver que les plus pertinents. Pour ce faire, des critères de pertinence (Tableau 2) ont été établis. Les résumés des articles ne rencontrant pas suffisamment ces critères ont été disqualifiés, alors que les autres ont pu être conservés pour la prochaine étape.

Tableau 2 : Liste des critères de pertinence pour la sélection d'articles scientifiques

Numéro	Critère	Description	Cote de pertinence et définition		
			Excellent (++)	Acceptable (+)	Inacceptable (-)
2.1	Pratique agronomique	La pratique agronomique doit être facilement applicable à la ferme	La pratique est utilisée sur des fermes existantes	La pratique est utilisée sur des sites de recherche	La pratique n'est pas applicable à la ferme
2.2	Caractéristiques du lixiviat	Le lixiviat ciblé par la pratique doit être lié à l'usage de produits du milieu agricole	Le lixiviat contient du nitrate découlant de l'usage des engrais azotés.	Le lixiviat contient des éléments découlant de l'usage de produits agricoles.	Le lixiviat contient d'autres contaminants d'origine non agricole
2.3	Conditions climatiques	La pratique agronomique doit être applicable sous des conditions climatiques similaires à celles du Québec	La pratique agricole est applicable sous climat continental humide	La pratique agricole est applicable en zone tempérée	La pratique agricole n'est pas applicable sous les conditions climatiques du Québec
2.4	Domaine d'application	La pratique agronomique doit réduire le lessivage découlant de la culture de la pomme de terre	La pratique agronomique est utilisée dans la culture de la pomme de terre	La pratique agronomique est utilisée dans d'autres cultures maraîchères de plein champ	La pratique agronomique est utilisée dans d'autres cultures
2.5	Nature du sol	La nature du sol doit favoriser le lessivage	Le sol mentionné est léger	Le sol mentionné est minéral	Le sol mentionné est ni léger, ni minéral ou la nature du sol n'est pas mentionnée

La quatrième étape consistait à évaluer la validité scientifique à l'aide d'une liste de contrôle systématique (Tableau 3). Chaque étude a également été évaluée globalement en utilisant une cote (++, + ou -) basée sur la façon dont les biais potentiels ont été réduits (Tableau 4). Deux évaluateurs étaient requis afin de diminuer davantage le biais potentiel dans l'évaluation.

Tableau 3. Évaluation de la validité des articles scientifiques retenus

Numéro	Paramètres	Évaluation du paramètre	
3.1	L'étude répond à une question claire et précise	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable
3.2	Une description de la méthodologie est incluse	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable
3.3	La revue de littératures est suffisamment rigoureuse afin d'identifier l'ensemble des articles pertinents	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable
3.4	La seule différence entre les unités expérimentales est le traitement évalué	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable
3.5	L'ensemble des mesures sont faites en utilisant une méthode valide et fiable	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable
3.6	La qualité de l'étude est prise en considération	-Bien couvert -Adéquatement couvert -Mal couvert	-Non couvert -Non rapporté -Non applicable

Tableau 4. Évaluation générale des articles scientifiques

4.1	Comment l'étude s'assure de réduire les biais? Cote ++, + ou –
4.2	Si le code est + ou -, comment le biais a pu affecter les résultats? (positivement ou négativement)
4.3	En considérant les aspects agronomiques, votre évaluation de la méthodologie et l'exactitude des statistiques utilisées, êtes-vous certain que l'effet global est dû aux interventions effectuées? (élevé, moyen, faible)
4.4	Le traitement est-il la cause des résultats? (élevé, moyen, faible)
4.5	Est-ce que les résultats de l'étude sont directement en lien avec ses objectifs? (élevé, moyen, faible)

Finalement, lors de la cinquième et dernière étape, l'ensemble des articles ayant subsisté au processus complet d'évaluation ont été résumés et utilisés afin de rédiger la revue de littérature.

2.2. Procédé des entrevues

En préparation aux entrevues, une liste de question a été préétablie. L'ensemble des questions a été posé à chacun des intervenants dans le même ordre. Les réponses étaient notées et un résumé d'entrevue était rédigé à la suite de chacune. Il a aussi été demandé à chacun des intervenants interrogés de partager leurs connaissances concrètes par rapport à chacun des thèmes couverts par la revue. Également, chaque intervenant a suggéré une liste de solutions qu'il jugeait les plus pertinentes en lien avec ses expériences et la problématique.

2.3. Résultats de la revue systématique des articles

La revue systématique des articles effectuée à l'aide des trois moteurs de recherche, des mots clés et de la période couverte mentionnés ci-dessus a permis de répertorier 3 819 articles. De ce nombre, 700 articles ont été soumis à l'étape 3, alors que tous les autres ont été exclus puisqu'ils ne répondaient à aucun des critères d'inclusion. Par la suite, l'évaluation des articles avec les critères de pertinence a permis de ne conserver que 300 articles. L'évaluation de la validité scientifique effectuée à l'étape 4 s'est conclue par la conservation de 291 articles, lesquels ont finalement été résumés et utilisés pour rédiger la revue de littérature.

2.4. Résultats des entrevues

Suite aux entrevues, les résumés ont tous été relus. Les informations consignées et les recommandations découlant de chacun des intervenants ont été insérées dans les sections pertinentes de la revue et sont présentées à l'intérieur de chacun des thèmes couverts.

3. Synthèse et hiérarchisation des stratégies retenues

À la suite de la synthèse des informations, une journée de réflexion a été tenue avec le comité consultatif afin de hiérarchiser les stratégies présentant un potentiel de réduction des pertes de NO_3 par lessivage pour le Québec. Cette hiérarchisation s'est faite selon deux modes de classement; la nature prioritaire souhaitée de la stratégie (horizontal) et sa complexité d'application (vertical) selon le niveau technique, les coûts ou les besoins de recherche encore existant. Ainsi, une stratégie peut être jugée hautement prioritaire, mais présenter un long délai d'adoption par les producteurs puisque son stade de développement est toujours à l'étape exploratoire ou qu'elle est coûteuse à implanter ou exige une gestion ou l'utilisation d'équipement plus complexe. Également, parmi la liste des stratégies proposées, certaines sont globales et d'autres plus spécifiques à chaque entreprise. C'est pourquoi, d'abord et avant tout, les solutions proposées doivent être appliquées selon une démarche intégrée entre le producteur et le conseiller agricole qui, pour sa part, devra être outillé pour poser un diagnostic sur les conditions de la ferme et sur les pratiques culturales les plus susceptibles d'avoir un effet positif et significatif pour contrer le lessivage du NO_3. En somme, la philosophie globale d'action devrait se décliner ainsi : maximiser la fourniture naturelle en N du sol afin de minimiser la dose d'apport complémentaire externe, apportée à une dose adéquate, à un temps et selon un mode qui favorise son prélèvement, en mettant en place des pratiques et aménagements qui ultimement minimisent les pertes de N résiduel.

Tableau 5. Schéma de hiérarchisation des solutions proposées pour limiter les pertes par lessivage.

Prioritaire /prévention → **Complémentaire / atténuation**

Applicabilité (Coût/expertise/besoins de R&D): **(-)** → **(+)**

Connaître et accroître la fourniture naturelle en azote des sols	**Déterminer le besoin adéquat en azote**	**Optimiser les prélèvements**	**Minimiser les pertes vers l'environnement**
Diagnostic d'entreprise *Pratiques culturales et état des sols*	Spécificité du cultivar	Déterminer les moments cibles d'apports Formes d'engrais et fractionnement des doses (granulaire)	Cultures pièges
Correction et maintien de la santé des sols *Décompaction* *Apports de MO* *Engrais verts* *Rotations*	Bilan N (entrées + sorties) Tests d'évaluation du statut N des plants et du sol	Irrigation raisonnée	Aménagements *Bandes enherbées* *Réservoirs comme marais filtrants*
Tests diagnostiques de santé globale de sol	Agriculture de précision Modélisation globale des recommandations	Fractionnement des doses (fertigation) Engrais à libération contrôlée	Modélisation globale des pertes

De façon plus détaillée, l'action prioritaire à entreprendre pour toute entreprise agricole est ainsi l'évaluation de l'état de santé globale de ses sols par une caractérisation approfondie de leurs paramètres chimiques, physiques et biologiques. Tout d'abord, ceci permet de cerner ce qui limite leur capacité à fournir naturellement du N, fonction à prioriser puisque celle-ci s'appuie sur la minéralisation du pool de N organique (N_o), non lessivable, qui libère graduellement le NO_3, favorisant ainsi son prélèvement avant son lessivage. En second lieu, elle dégage les causes, autres que la fertilisation, susceptibles de limiter la production, évitant ainsi de fertiliser en excès pour contrebalancer ces lacunes (ex. compaction, déperdition de MO, mauvais pH).

Viennent ensuite toutes pratiques permettant de maintenir et de bonifier cette fertilité sur le moyen-long terme (ex. engrais verts, types de rotation), réduisant d'autant les besoins en apports externes de N. Toutefois, pour profiter de cette fourniture naturelle en N, il devient par la suite essentiel de la quantifier le plus précisément possible pour ajuster adéquatement ces besoins externes. La dose complémentaire externe doit quant à elle être fixée de la façon la plus spécifique possible, *i.e.* en tenant compte des spécificités des cultivars produits, du site (sol et climat). La dose réellement appliquée doit être celle ciblée précédemment. Par exemple, si des engrais organiques sont épandus, ceux-ci doivent être adéquatement caractérisés et les bons coefficients d'efficacité du N employés. Tant pour les engrais organiques que minéraux, l'épandeur doit être bien calibré.

Il faut ensuite fractionner l'apport externe afin de se garder une fenêtre d'ajustement et apporter les quantités les plus importantes au moment critique des besoins de la culture. Ceci permet de tenir compte des conditions climatiques ou sanitaires qui auront prévalu entre la plantation et le fractionnement, qui viennent modifier l'activité de minéralisation du sol et la croissance de la culture pendant la saison. Le producteur peut ensuite raffiner sa gestion afin d'augmenter l'efficacité de prélèvement (ex. fertigation, taux variables par agriculture de précision, placement et types d'engrais). L'utilisation judicieuse et raisonnée de l'irrigation, qui permet d'accroître la fertilité naturelle des sols et de maximiser les prélèvements en N, s'inscrit dans cette lignée. Comme il ne sera jamais possible d'obtenir une adéquation parfaite entre apport et prélèvement de N, le producteur doit prendre des mesures pour maximiser le prélèvement du NO_3 résiduel post-récolte et minimiser sa dispersion. Ces stratégies peuvent être à l'échelle de la ferme (ex. cultures pièges post-récolte) ou du bassin versant (ex. bandes riveraines). Des modèles de simulation des pertes peuvent aussi être mis à profit pour en comprendre la dynamique et orienter les mesures correctives.

Au final, la mise en commun de toutes ces mesures peut également avoir un effet global supplémentaire de réduction du lessivage du NO_3 si la hausse engendrée de productivité à l'hectare se traduit par une réduction des superficies en pommes de terre. Les sections qui suivent expliquent plus en détails chacune des actions qui peuvent être entreprises et les tests ou outils disponibles pour les mettre en œuvre.

4. Faire le bilan des pratiques et de l'état de santé globale du sol

Dans les systèmes agricoles intensifs, la perte de capacité de fourniture intrinsèque en N du sol doit généralement être compensée par l'ajout de fertilisants. Cette capacité se perd au fur et à mesure que la santé du sol se dégrade, principalement à cause de la déperdition de la MO résultant du travail répété des sols et de l'exportation massive de la biomasse par les récoltes. Il s'en suit une dégradation de la structure du sol occasionnant sa compaction et une diminution de sa capacité de rétention en eau et de son contenu en oxygène. Ces conditions de sol défavorables sont un frein à la croissance racinaire et par le fait même à l'assimilation de l'eau et du N (Alva 2004). Les réserves en N_o et les populations microbiennes bénéfiques, responsables de sa minéralisation seront également touchées (Kuzyakov et Xu 2013). D'autres paramètres chimiques importants, comme le pH, ou la texture du sol influencent également la réponse à la fertilisation. Le feuillet technique *Viser la dose optimale d'azote pour concilier profits et environnement* montre d'ailleurs l'importance relative de ces différents facteurs dans le choix de la dose économique optimale de N à apporter (Tremblay et Seydoux 2016). Caractériser en profondeur les différents facteurs impliqués dans la fertilité du sol y ressort également comme une action principale à mettre de l'avant, car ce diagnostic permet de savoir quels correctifs sont à apporter lors de l'observation de contraintes.

La caractérisation complète des sols demeure cependant une lacune importante chez les producteurs québécois, bien qu'elle s'avère un outil clé dans la gestion du N (Bergeron 2016 [comm. pers.]). Il a en effet été démontré que les variations spatiales du rendement étaient corrélées aux propriétés du sol et que la réponse aux apports de N de tout un champ pouvait être extrapolée par ces corrélations (Shillito et coll. 2009). ***Ainsi, certains producteurs se tournent vers l'application accrue d'engrais N lors d'observations de baisses de rendement, alors que des évaluations vont montrer que ces baisses sont souvent dues à la compaction du sol. Dans ces circonstances, les apports additionnels de N sont inutiles à la plante et seront perdus par lessivage*** (Bergeron 2016 [comm. pers.]).

En ce moment, diverses approches d'évaluation de la santé globale du sol sont mises de l'avant. Certaines, comme celle de l'Institut Cornell, adapté pour le Québec (Huber 2016), ou du Laboratoire d'écologie microbienne (LEM) de l'IRDA (Jeanne et Hogue 2016), sont offertes au Québec. D'autres, comme celle du test de Haney (Haney 2008), sont répandues aux États-Unis et en voie d'être testées ici. Ces tests dressent un bilan chimique ou physique et/ou biologique du sol, selon le cas, en considérant une multitude de paramètres (ex. agrégats stables à l'eau, pH, texture, carbone actif, respiration microbienne, concentrations en N–P-K…). Le diagnostic est donc complet et indique les contraintes à la production. Les résultats sont en effet le plus souvent présentés comme un indice calibré, facile à interpréter. Par exemple, chaque variable du test de Cornell reçoit une note de 0 à 100, en fonction de différents indicateurs et systèmes de classement. À mentionner d'ailleurs que des indicateurs spécifiques au sol sous culture de pommes de terre sont en train d'être développés. Les notes inférieures indiquent les contraintes

devant être traitées. Évidemment, il importe ensuite d'apporter les correctifs nécessaires et de maintenir l'état de santé amélioré. Ces actions sont encouragées par le biais de l'étude de ces valeurs que l'on peut voir évoluer et pour lesquelles on peut se fixer des cibles tangibles.

5. Adopter des pratiques qui favorisent la fourniture en N du sol

La production intensive de pommes de terre, accompagnée d'une fertilisation dominante d'engrais minéraux et de courtes rotations incluant souvent une autre culture exigeante, favorise la dégradation des sols et hausse les besoins en fertilisants N pour compenser la perte de fertilité et accroît le lessivage du NO_3 (Zielke et Christenson 1986). L'usage de cultures de couverture ou d'engrais verts et de rotations plus longues a ainsi été proposé pour maintenir les stocks de MO et enrichir le sol en N_o labile (Sanchez et coll. 2001; Stark et Porter 2005 ; Nelson et coll. 2009). ***Cette mesure s'accorde bien avec l'imposition récente à certains producteurs de rotations minimales de trois ans pour briser le cycle d'infestation du nématode doré suite à sa découverte au Québec en 2006*** (Perreault 2016 [comm. pers.]). Néanmoins, la pratique de rotation courte de 2 ans a toujours cours au Québec. ***La tendance est aux rotations de type pomme de terre - avoine - pomme de terre - maïs*** (Roy 2016 [comm. pers.]). La production de pommes de terre en continu est encore assez courante, ou fait place à de courtes rotations de cultures exigeantes de types pommes de terre (2x) - maïs/millet perlé ou d'autres comme pomme de terre (1x) - maïs.

Conduire des rotations plus longues, incluant des cultures moins exigeantes en N ou plus efficaces à le prélever, diminue effectivement l'impact du système de production sur la qualité de l'eau. Par exemple, sous prairies, les concentrations moyennes annuelles de NO_3 dans l'eau de drainage sont estimées à 1-3 mg NO_3-N/L, alors qu'elles sont de 5 mg NO_3-N/L sous culture de maïs ensilage (Milburn 1996). Lors d'une étude de 10 ans à l'Î.-P.-É. (1989-1999), la moyenne annuelle des concentrations en N dans l'eau de drainage était au-dessus de 10 mg NO_3-N/L (11-27 mg NO_3-N/L) à chacune des quatre années en pommes de terre de la rotation, contrairement à des concentrations de 3-11 mg NO_3-N/L les autres années (céréales ou légumineuses) (MacLeod et coll. 2002). Autre exemple, en prolongeant une rotation à 3 ans (orge - trèfle rouge - pomme de terre), 15 à 22 % moins de NO_3 lessivait, en comparaison d'une rotation de 2 ans (orge - pomme de terre) (Jiang et coll. 2012). L'implantation dans la rotation de cultures avec une plus longue saison de croissance et pouvant être implantées pendant 2 ans avant d'avoir à retravailler le sol, s'avère également une bonne stratégie dans une rotation de pomme de terre (Zebarth et coll. 2015). C'est ce qui s'observe dans les rotations de 4-5 ans en agriculture biologique. Par exemple, à l'Î.-P.-É. et au Nouveau-Brunswick, des concentrations inférieures en NO_3 résiduel (<25 kg NO_3-N/ha) sont mesurées en post-récolte de la pomme de terre dans les systèmes biologiques (Lynch et coll. 2012), en comparaison des systèmes conventionnels, tout comme aux États-Unis (Cambardella et coll. 2015) ou en France (Benoît et coll. 2014). Certes, les systèmes biologiques n'utilisent pas d'engrais minéraux hautement lessivables, mais la différence ne tient pas qu'à cela puisqu'ils utilisent des engrais verts facilement minéralisables

et appliquent des engrais de ferme riches en N, mais il semble que leur effet soit tempéré par la régie et la qualité des sols (Lynch et coll. 2012).

Il demeure toutefois que les systèmes impliquant la valorisation accrue d'engrais verts comme source de N méritent davantage d'évaluations pour saisir les interactions entre, d'une part l'amélioration de la qualité des sols, et d'autre part l'accroissement possible des pertes de NO_3 par lessivage lors de l'année en pomme de terre (Griffiths et coll. 2010; Bergeron 2016 [comm. pers.]). En effet, les engrais verts de légumineuses dans les rotations peuvent apporter jusqu'à 240 kg N/ha pour l'année suivante en pomme de terre (Lynch et coll. 2012) et peu de données sont actuellement disponibles concernant le moment du pic de relâchement du NO_3 et sur les quantités de NO_3 résiduel pouvant en résulter. Toutefois, Landry et coll. étudieront (2016-2018) les pics de libération du N de différents engrais verts (graminées et légumineuse) pour l'année pomme de terre, dans le cadre d'un projet Innovaction - Cultivons l'avenir 2 du MAPAQ et les conclusions seront disponibles en 2019. Il existe également un recueil d'information sur les engrais verts et leurs particularités en contexte québécois de production qui peut être consulté afin d'orienter le choix des engrais verts à implanter dans la rotation (Weill et Duval 2009). Par ailleurs, il a déjà été démontré que des engrais verts (moutarde jaune, millet sibérien et millet perlé) cultivés suivant une culture de pomme de terre permettaient de limiter considérablement la migration du N dans le profil du sol, en comparaison des cultures de rotation plus traditionnelles du Québec (avoine-orge-maïs-grain) (N'Dayegamiye et coll. 2010a). De plus, ces engrais verts retenaient 46% du N résiduel provenant de la saison en pomme de terre, en plus de produire une grande quantité de biomasse qui, laissée au champ, retournait au sol des quantités de N_o appréciables pour les cultures subséquentes (N'Dayegamiye et coll. 2010a).

Enfin, l'apport combiné de sources organiques et inorganiques de N est également associé à une plus forte productivité et une meilleure utilisation du N. La synchronisation entre la disponibilité du N dans le sol et les besoins de la plante serait améliorée en combinant des amendements avec des ratios C/N hauts et bas et des engrais minéraux. Cette synchronisation serait expliquée par l'équilibre entre la minéralisation du N_o et l'immobilisation du N minéral par les micro-organismes (Myers et coll. 1994). Dans un essai de pomme de terre au Michigan, l'effet de l'incorporation au printemps d'une culture de seigle d'automne et l'application de fumier de poulet, combiné à des engrais minéraux, a permis d'accroître de 20 % les rendements en pommes de terre (Nyiraneza et Snapp 2007). De plus, la minéralisation du N_o semblait avoir suivi les besoins de la plante en comparaison du traitement conventionnel et les concentrations en NO_3 résiduel n'étaient pas plus importantes en fin de saison.

6. Prédire adéquatement la fourniture en N du sol

Il est reconnu que le sol peut fournir une importante quantité de N à la culture de pommes de terre par minéralisation du N_o. Par exemple, dans un essai réalisé dans la région de Portneuf avec le cultivar Goldrush, Landry et Boivin (2014a) ont démontré que le sol seul avait fourni,

pendant les deux années, le tiers des besoins en N maximaux atteints par la culture, soit 47 et 45 kg N/ha en 2011 et 2012, respectivement. La considération d'une partie de ce N lors du calcul des doses d'engrais N, en fonction des taux de MO du sol, est déjà dans les pratiques des agronomes (CRAAQ 2010). Un calcul plus précis peut aussi s'effectuer selon des équations développées au Québec (Simard et N'Dayegamiye 1993) et décrites dans le *Guide de référence en fertilisation du CRAAQ* (GREF) (CRAAQ 2010) qui prédisent la minéralisation du N à partir des contenus en argile et des concentrations en N_o ou en C organique du sol. Une autre méthode simple du point de vue technique, mais qui demande un certain investissement en temps, permet d'obtenir *in situ* une valeur de fourniture effective en N du sol. Elle consiste à créer une parcelle témoin sans apport de N au champ dont les rendements sont ensuite comparés avec ceux de plants ayant reçus des doses croissantes de N (Parent et coll. 2008). Évidemment, cette fourniture n'est connue qu'une fois la saison terminée et sera de nature variable d'année en année, en fonction des conditions de climat et de l'évolution de la qualité du champ. Il demeure toutefois que le producteur a ainsi une meilleure idée de sa marge de manœuvre, ce qui peut prévenir des fertilisations excessives.

Connaître précisément la quantité de N qui sera fournie par le sol, en début de saison, afin de s'en servir durant cette même saison, demeure donc encore à ce jour difficilement réalisable (Zebarth et coll. 2009). Malgré tout, des études récentes se sont penchées sur le développement de tests de laboratoire, se voulant plus simples, dans le but de les introduire dans les tests de routine. Les applications commerciales de ces tests sont par contre encore limitées et leur efficacité à prédire la fourniture en N du sol est variable (Bundy et Ostherhaus 2006) mais permet déjà d'avoir une bonne idée de cette fourniture. Certains de ces tests vont quantifier directement la fraction labile du N_o du sol. Ce dosage peut se faire par spectroscopie d'absorption UV (Serna et Pomares 1992) ou avec le test de sol N de l'Illinois (*amino sugar N*) (Khan et coll. 2001). Il y a aussi la spectroscopie proche infrarouge (dite aussi NIRS, pour *Near infrared spectroscopy*). Elle est rapide et non destructive (Malley et coll. 2002; Nduwamungu et coll. 2009a,b), mais habituellement utilisée pour l'analyse des plantes. Toutefois, elle a été utilisée avec succès dans une culture de maïs de l'est du Canada par Nduwamungu et coll. (2009a) qui ont pu prédire adéquatement le potentiel de minéralisation du N à partir de la fraction de MO du sol et de son contenu en argile. Cette technique mériterait donc davantage d'investigation pour évaluer son efficacité en culture de pommes de terre. D'autres tests font plutôt une mesure directe du taux respiratoire des micro-organismes responsables de la minéralisation de N_o en mesurant la concentration en CO_2 dégagée par le sol suite à une incubation de 24 heures. Le test Solvita, commercialisé aux États-Unis, s'appuie sur cette théorie. Il est simple d'utilisation et peut être réalisé à la ferme à l'aide de bandes tests. Les concentrations en CO_2 mesurées sont ensuite converties en concentrations de N potentiellement minéralisées. C'est d'ailleurs la technique utilisée à l'intérieur du test de santé globale des sols de Haney (Haney 2008) qui est bien implanté aux États-Unis et qui utilise les valeurs de respiration microbienne et le ratio C/N du sol pour prédire le N qui sera minéralisé pendant une saison. Pour l'instant, ce test n'est cependant pas offert par les laboratoires québécois et comme il a été développé dans l'ouest américain, il devra être calibré pour les sols

www.irda.qc.ca

du Québec. La version adaptée pour le Québec du test de Cornell utilise pour sa part, la minéralisation anaérobique comme indicateur. Toutefois, depuis 2015, la respiration microbienne quatre jours et la détermination de l'azote des protéines ont été ajoutées à l'intérieur du test de Cornell aux États-Unis (Moebius-Clune et coll. 2016), ce qui démontre la pertinence de l'étude de l'activité microbienne dans la prédiction de la fourniture en N du sol.

7. Apporter la dose optimale de N

Malgré une bonne fourniture en N par le sol, en culture de pommes de terre, les besoins demeurent élevés et des apports externes sont généralement nécessaires pour assurer de bons rendements. Il incombe donc de prédire le plus précisément ce besoin, afin de ne pas dépasser la capacité de prélèvement de la culture, ce qui se solderait par la perte de l'excédent dans l'environnement.

Les recommandations officielles publiées dans le GREF (CRAAQ 2010) proposent des outils pour établir la dose optimale de N à apporter annuellement. Elles prônent également une approche par bilan pour permettre d'ajuster au cas par cas les recommandations d'engrais N par le calcul des entrées et des sorties de N dans le système sol-plant, telle que la quantité de N qui provient de la MO, des précédents et résidus culturaux, de même que les apports antérieurs d'engrais organiques. De plus, ces calculs doivent être ajustés en fonction des facteurs de sols (la texture, la structure, la compaction et le drainage des sols, la distribution spatiale de la matière organique et le pH du sol), du climat, ainsi que des besoins en azote spécifiques au cultivar. Si les valeurs réelles de certains des paramètres du bilan ne sont pas connues, des estimations peuvent être utilisées à l'aide de tables développées suivant de vastes recherches agronomiques. Par exemple, dans le cas des apports de fumier, des indices de perte d'azote basés sur le matériel d'épandage, le type de fumier et les pratiques d'incorporation seront appliqués selon des critères préétablis. En Europe, on utilise également une approche similaire par bilan pour prédire les besoins en N annuels (Cohan 2011). Ce bilan inclut néanmoins plus de paramètres que le bilan québécois. Entre autres, le contenu en NO_3 de l'eau d'irrigation est dosé et comptabilisé à chaque épisode d'irrigation comme entrée de N dans le système (Cohan 2011). Malgré le calcul du bilan prévisionnel N, on observe toujours des problèmes de surfertilisation dans les champs de pommes de terre au Québec, alors qu'il est fréquent de mesurer des concentrations en NO_3 résiduel de 60-100 kg NO_3-N/ha (Lynch et coll. 2012) et des concentrations de NO_3 dans l'eau de drainage supérieures à 10 mg NO_3-N/L (Zebarth et coll. 2009 ; Boivin et Landry 2012). Trois éléments peuvent expliquer les risques de surfertilisation; la surfertilisation intentionnelle, le choix du cultivar et les apports fondés sur la dose économique de N.

7.1. Surfertilisation intentionnelle

Il est fréquent qu'une dose d'engrais N supérieure à celle recommandée soit appliquée comme marge de sécurité pour assurer des rendements maximaux. La principale cause de cette insécurité est le risque de pluies abondantes en début de saison. Pour contrer les pertes anticipées de N par lessivage, un apport supplémentaire de N est donc appliqué. Toutefois, il est important de savoir que ce risque est déjà considéré dans les doses recommandées par le GREF (2010). Il reste donc un travail de sensibilisation à faire pour renverser cette pratique.

7.2. La dose économique de N (DÉO)

Les grilles de recommandations du GREF (2010) se basent également sur des critères économiques et biologiques pour établir la dose de N à apporter pour la pomme de terre (Zebarth et Rosen 2007; CRAAQ 2010). Le choix de cette dose s'appuie sur le fait que les rendements totaux, le poids spécifique des tubercules et, conséquemment, les rendements vendables, augmentent avec des doses croissantes de N jusqu'à l'atteinte d'un plateau, avant de diminuer (Fig. 2). Il est donc théoriquement possible de connaître la dose de N nécessaire pour atteindre le maximum de rendement, qui diffère de la dose économique optimale (DÉO) qui permet théoriquement d'obtenir la meilleure marge de profit (Zebarth et coll. 2015). Toutefois, ce concept est beaucoup plus compliqué à appliquer dans la réalité. D'une part, les doses de N requises sont très variables selon les champs et les années (Bélanger et coll. 2000; Zebarth et coll. 2009). À titre d'exemple, les recommandations de DÉO peuvent être très variables au Québec. Celles mesurées sur 14 sites en culture de pommes de terre variaient de 46 à 200 kg N/ha (N'Dayegamiye et coll. 2010b). À cet égard, le GREF (2010) fournit une plage de recommandations qui représentent les balises de DÉO moyennes compilées au Québec. Malgré tout, les fertilisants N minéraux étant relativement peu dispendieux en comparaison de la valeur marchande des tubercules, la dose de N économiquement rentable ($/ha) est seulement légèrement inférieure à celle permettant les rendements maximaux.

Par ailleurs, la DÉO n'est pas la dose à laquelle le N sera le mieux utilisé par la culture. Tout comme le retour sur chaque dollar investi, le gain de productivité sur chaque kg de N supplémentaire apporté diminue au fur et à mesure que la culture atteint le maximum de rendement et que sa capacité d'utilisation du N diminue. Conséquemment, on observe un accroissement exponentiel du N résiduel dans le sol avec l'accroissement des doses (Fig. 2). Il a donc été récemment soulevé que dans le cas particulier de la pomme de terre, il existe une incohérence entre les recommandations de N dans une perspective économique vs. une perspective environnementale pour réduire les pertes de N par lessivage (Zebarth et coll. 2015). Ainsi, même si l'utilisation de la DÉO offre un certain compromis en comparaison de la dose maximale, il demeure qu'elle est souvent plus élevée que celle permettant le meilleur taux d'utilisation du N, et cela parfois de façon très importante. Par exemple, dans une étude récente réalisée dans la région de Portneuf, Landry et Boivin (2014a) ont démontré que la dose d'engrais

N permettant une utilisation optimale du N par la culture de pomme de terre lors d'une année sur deux était aussi basse que 100 kg N/ha, tandis que la DÉO suggérée suivant les deux années de courbe de réponse de l'étude était de 185 kg N/ha.

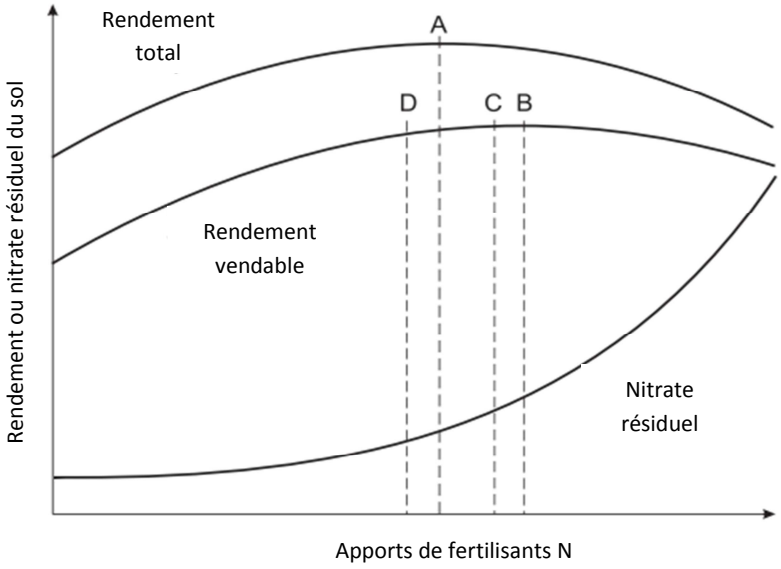

Figure 2. Relation conceptuelle entre les rendements en pommes de terre, le nitrate résiduel et les apports de fertilisants N, indiquant A) rendement maximal atteint; B) rendement vendable maximal atteint; C) rendement vendable nécessaire pour optimiser le retour sur investissement D) le nitrate résiduel augmente rapidement avec les doses croissantes de N (adapté de Zebarth et coll. 2015).

7.3. Besoins du cultivar et sélection variétale

Selon leur génétique et leur usage, les cultivars présentent des distinctions dans leurs besoins en N. Il est donc primordial de considérer ces particularités lors de l'établissement de la dose de N à fournir. Les cultivars hâtifs auront des besoins totaux en N inférieurs aux cultivars tardifs (Zebarth et coll. 2004a). Il convient donc de bien s'informer des caractéristiques des cultivars produits. Malheureusement, même si l'on connaît bien les besoins en N de certains cultivars couramment produits (ex. Goldrush ou Shepody), à l'intérieur des publications du CRAAQ - *Profils techniques et agronomiques de cultivars de pomme de terre*, (Agri-Réseau 2016), ***un flou règne pour plusieurs nouvelles variétés maintenant disponibles et exigées par le marché, pour lesquelles il n'existe pas de grille de recommandations établie à la suite d'essais expérimentaux*** (Thibault 2016 [comm. pers.]). Les recommandations sont alors basées sur le principe d'essais et erreurs, ce qui peut mener à une surfertilisation intentionnelle. L'établissement des besoins précis de chaque variété sur le marché devrait donc être la norme pour éviter ces risques de surfertilisation.

D'autres parts, les cultivars commerciaux à haut rendement sont tout particulièrement exigeants en N. On estime que 2,5-5,9 kg N/ha sont nécessaires pour chaque tonne de tubercules produits (Munoz et coll. 2005). D'autres études ont par contre rapporté que les variétés rustiques avaient une récupération supérieure du N appliqué, par exemple de 25-49 % contre 16-36 % pour les variétés commerciales (Errebhi et coll. 1998), une caractéristique qui semble donc s'être perdue au fil des programmes de sélection variétale dont les objectifs généraux sont plutôt d'augmenter les rendements, la qualité des tubercules, la résistance aux maladies, ainsi que les caractéristiques d'entreposage et de transformation alimentaire. Pour accroître l'efficacité d'utilisation du N par les cultivars commerciaux, il faudrait donc que les programmes se tournent également vers cet aspect (Yamaguchi et Tanaka 1990).

L'efficacité d'utilisation du N pourrait également être augmentée par une modification génétique plus directe de ce paramètre (Giller et coll. 2004). Ce secteur de recherche est toutefois nouveau et les processus régulant l'efficacité d'utilisation du N par les cultures sont complexes et encore mal connus (Hirel et coll. 2011). Néanmoins, des programmes sont en cours pour identifier des marqueurs génétiques de différents traits agronomiques et de fonctions métaboliques. Le potentiel de combiner cette approche à celle des programmes de sélection variétale pourrait bientôt améliorer l'efficacité d'utilisation du N de la culture et sa performance en condition de N limitée (Zebarth et coll. 2009; Hirel et coll. 2011).

8. Ajuster adéquatement la dose de N provenant des fertilisants

En plus des éléments à risque de provoquer une surfertilisation, mentionnés à la section 7, il est également important d'ajuster adéquatement les apports d'engrais en saison selon la fourniture du sol et les besoins spécifiques de la culture qui, en fonction de multiples facteurs (ex. excès d'eau, stress hydriques, froid, maladies, etc.), varient d'une saison à l'autre (Dalla Costa et coll. 1997 ; Miller et Rosen 2005). Pour ajuster ces apports subséquents avec les besoins annuels spécifiques de la culture, les chercheurs ont travaillé à mettre au point différents outils et indicateurs du statut azoté du sol et/ou de la plante permettant de déceler des carences ou des excès en N à un certain stade de croissance auquel il est encore possible de corriger le tir si nécessaire (Alva 2004; Goffart et coll. 2008). Ces outils sont par contre peu répandus dans la pratique, car ils requièrent des investissements conséquents en argent et en main d'œuvre qualifiée pour conduire les échantillonnages et réaliser l'interprétation des données. De plus, la précision des résultats est variable dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions qui prévalent et ils ne permettent pas d'obtenir directement une dose précise à apporter suite par exemple, à l'observation d'une carence, mais indiquent plutôt un manque ou une suffisance. Pour arriver à l'adoption de leur utilisation courante, il faudra accentuer les recherches pour que ces tests offrent des méthodes moins coûteuses, plus sensibles, arrivant à prédire une dose assez précise (Parent et coll. 2008). Une description sommaire de ces méthodes et de leurs avantages et désavantages est présentée ci-dessous. Toutefois, un producteur désireux de pousser l'analyse du bilan N de sa culture grâce à ces outils devrait trouver des précisions complémentaires auprès des conseillers agricoles, des laboratoires d'analyses

environnementales ou auprès des représentants et des manuels d'utilisation de ces outils pour s'assurer de mener correctement les échantillonnages et les interprétations.

8.1 Tests de statut azoté du sol

Juste avant la plantation, le dosage du contenu en NO_3 du sol est bien corrélé avec les prélèvements en N de la pomme de terre (Sharifi et coll. 2007) et ce paramètre pourrait être inclus facilement dans l'analyse de sol de printemps. Néanmoins, ce seul test est considéré comme un faible indicateur par rapport au choix de la dose optimale de N à appliquer (Bélanger et coll. 2001a; O'Halloran et coll. 2004). Étant réalisé au printemps, il est de peu d'utilité pour ajuster la dose d'apport en cours de route. Un test effectué en post-émergence, intégrant donc ce qui s'est passé au champ depuis la plantation, serait un indicateur plus profitable. Ce test propose le dosage du NO_3 du sol dans la couche 0-30 cm. Pour la pomme de terre, le seuil critique a été mesuré à 22,9 mg NO_3/kg de sol lorsque dosé avec la méthode du KCl 2M alors qu'avec une autre méthode d'extraction, la méthode Nitracheck (0,025M Al_2 (SO_4) 18 H_2O + 0,050M NaCl), la valeur cible était plus élevée et plus variable (N'Dayegamiye et coll. 2010b). Ainsi, en compromis, pour s'assurer d'obtenir au moins 85% du potentiel de production du site (85% de rendement relatif), il ne serait pas nécessaire d'apporter des engrais minéraux azotés en post-émergence lorsque les concentrations en NO_3 du sol sont supérieures à 20 mg NO_3/kg de sol avec ces deux extractifs (N'Dayegamiye et coll. 2010b). Toutefois, cela est vrai sous des conditions favorables de sol et de climat. La recommandation d'apporter ou non un complément de N devrait donc toujours considérer les conditions spécifiques de chaque ferme (conditions physiques et fertilité des sols, précédents de culture, conditions climatiques de la région) (N'Dayegamiye et coll. 2010b). Par exemple, une teneur critique de mi-saison de 80 mg N-$N0_3$/kg (32-47 jours après plantation) a été retenue comme indicateur de suffisance en N dans la couche 0-30 cm pour un site au Nouveau-Brunswick (Bélanger coll. 2001a), alors que dans d'autres essais au Québec, même avec une teneur de 100 mg N-NO_3/kg mesurée à la même période, la pomme de terre répondait encore à des applications supplémentaires de N (Parents et coll. 2008).

8.2 Tests de statut azoté de la plante

Les tests d'évaluation du statut azoté de la plante peuvent être classés en trois grandes catégories : les tests chimiques, optiques et génétiques. Les tests chimiques sont actuellement les plus précis car ils mesurent les contenus en N de la plante. Par contre, les analyses sont coûteuses et requièrent des échantillonnages exhaustifs et destructifs pour être représentatifs. Également, plus la partie du plant testée est petite (plant vs. feuille vs. pétiole), plus la précision des valeurs obtenues diminue. Les tests optiques sont plus simples d'utilisation en pratique, mais ils requièrent des indicateurs spécifiques en fonction de chaque site. De plus, ces indicateurs sont obtenus par l'inclusion de parcelles témoins non fertilisées (surtout) ou surfertilisées, ce qui complique leur utilisation sur de grandes superficies. Enfin, les tests

génétiques s'avèrent prometteurs d'un point du vue de la précision et de la rapidité de détection des carences en N, mais ils sont toujours à l'étape exploratoire et ils sont coûteux.

8.2.1 Tests chimiques

8.2.1.1 N critique et indice de nutrition azotée des plants

La détermination du N critique (Nc) établit la concentration minimum de N des tissus pour obtenir le maximum de croissance. Elle se mesure selon la relation suivante :

$$Nc = a (W) - b$$

Où Nc est la concentration en N critique (%), W est la biomasse sèche de la culture (T/ha) et a et b sont des paramètres obtenus en combinant la biomasse des fanes et des tubercules (a) et la concentration en N de cette biomasse (b).

À un niveau donné de biomasse accumulée durant la saison correspond ainsi une concentration de Nc. De ce fait, sous le Nc, la croissance est ralentie et au-delà, les besoins d'apport en N sont inutiles. Ce diagnostic nécessite donc l'analyse de l'ensemble du plant. Les essais réalisés avec la pomme de terre (Duchenne et coll. 1997; Bélanger et coll. 2001b) ont permis d'estimer en moyenne que a=5,0 et b=0,5. Cette méthode présente toutefois le désavantage de ne pas prendre en compte le cultivar et les limitations en eau. Au Québec, Bélanger et coll. (2001b) ont donc adapté les variables a et b en fonction du cultivar et de la présence ou non d'irrigation, mais pour seulement deux variétés (Shepody et Russet Burbank). Les courbes de Nc peuvent ensuite être utilisées pour calculer l'indice de nutrition azoté (INA), défini comme le ratio entre la mesure de concentration en N des fanes et le Nc prévu. Néanmoins, bien que la méthode INA s'avèrerait l'indicateur le plus fiable du niveau de suffisance en N du plant de pomme de terre en saison (Cambouris et coll. 2007; Ziadi et coll. 2012), elle ne permet pas de quantifier la dose supplémentaire de N à apporter au fractionnement lorsque le ratio montre une limitation (Goffart et coll. 2008). De plus, les courbes de réponse sont spécifiques aux sites où les mesures ont été prises (Parent et coll. 2008).

8.2.1.2 Statut azotée de la feuille au stade bouton

Le statut azoté de la feuille au stade bouton tout comme le nitrate du sol en post émergence sont significativement corrélés aux rendements relatifs de la pomme de terre (N'Dayegamiye et coll. 2010b). Le statut azoté de la feuille s'effectue en prélevant la 4ième feuille mature (pleinement développée) à partir de la cime du plant. Au stade bouton, un contenu en N total équivalent à 4,2 % est un indicateur de la suffisance en N du plant et signifie qu'aucun apport supplémentaire de N n'est nécessaire (N'Dayegamiye et coll. 2010b).

8.2.1.3 Teneur en nitrate des pétioles

La détermination du contenu en nitrate des pétioles est une approche plus répandue dans la pratique que l'INA. Comme avec la biomasse totale des plants, la concentration critique en nitrate des pétioles diminue pendant la saison de croissance (Porter et Sisson 1991). De plus, elle augmente avec la fertilisation N (Bélanger et coll. 2003). Également, cette méthode est plus simple d'utilisation que l'INA sur le terrain. En effet, des bandes tests peuvent être utilisées et interprétées à l'aide d'un appareil portatif (Goffart et coll. 2008), par exemple l'électrode Cardy ou le Nitracheck. Différents facteurs influencent la concentration en nitrate des pétioles dont le stade de développement, les doses de fertilisant N apportées, les stress hydriques et le cultivar (Ziadi et coll. 2012). Une limitation en eau peut donc, par exemple, résulter en une accumulation de nitrate dans les pétioles (Meyer et Marcum 1998), alors qu'un surplus les fait diminuer (Stark et coll. 1993). Il est donc important de calibrer les valeurs selon les sites et les cultivars étudiés. Des courbes de valeurs standards des contenus en nitrate des pétioles ont été développées pour différentes régions du nord-est des États-Unis ou au Nouveau-Brunswick et peuvent être consultées (Westcott et coll. 1991; Porter et Sisson 1991; Bélanger et coll 2003), mais aucune n'est spécifique pour le Québec. Enfin, tout comme pour l'INA, l'analyse des contenus en nitrates des pétioles permet d'évaluer le statut azoté de la culture en saison, mais ne quantifie pas la dose de N à apporter.

8.2.2 Tests optiques

Les tests optiques utilisent la télédétection ou spectroscopie, à l'aide d'instruments portatifs ou fixés au tracteur, ou à l'aide de l'imagerie aérienne ou satellite. Ces tests ne sont pas efficaces pour estimer directement les concentrations en N, mais utilisent la réflectance ou la transmittance de la lumière pour évaluer la suffisance en N des cultures (Zebarth et coll. 2009).

8.2.2.1 Mesures de la teneur en chlorophylle de la feuille

L'approche la plus commune de mesure de la teneur des feuilles en chlorophylle est celle du chlorophyllomètre. Un modèle portable employé régulièrement est le SPAD-502 (Minolta Corp., Japan). Il mesure le ratio de la transmission de deux longueurs d'onde dans le rouge (650 nm; absorption de la chlorophylle) et le proche infra-rouge (960 nm) qui sont absorbées différemment par la chlorophylle. De fortes corrélations sont obtenues entre ces mesures ; les teneurs en chlorophylle des feuilles (Olfs et coll. 2005; Samson et coll. 2006) et les rendements en pommes de terre (Minotti et coll. 1994). Plusieurs facteurs, incluant le cultivar, le type de sol et les conditions climatiques vont cependant influencer les valeurs mesurées (Gianquinto et coll. 2004). Ainsi, il n'est pas conseillé de travailler avec les données brutes, mais plutôt de les comparer avec des valeurs étalons obtenues de parcelles sous ou surfertilisées dans le champ suivi (Olivier et coll. 2006). La méthode serait aussi moins efficace lorsque la fertilisation est optimale. Elle permet donc surtout de déceler des déficiences en N (Goffart et coll. 2008; Parent

et coll. 2008). L'emploi de ce type d'appareil est populaire pour évaluer le statut azoté des plants en saison puisqu'il ne demande pas d'échantillonnage destructif et que la réponse est rapide et peu coûteuse, contrairement aux analyses chimiques. Cependant, il demeure que les mesures concernent souvent de petites superficies puisqu'un contact physique avec chaque feuille testée est nécessaire et qu'une parcelle témoin doit être inclue dans chacun des champs. Ceci devient problématique à grande échelle (Parent et coll. 2008). De plus, les déficiences en N seraient détectées plus tardivement qu'avec les mesures chimiques. En comparaison de la méthode de dosage de la teneur en nitrate des pétioles, l'écart est d'environ deux semaines (Wu et coll. 2007).

8.2.2.2 Mesures de la fluorescence de la chlorophylle de la feuille

L'analyse de la teneur en chlorophylle par fluorescence est une autre technique qui peut être utilisée pour évaluer le statut azoté du plant et qui est comparable aux mesures par transmittance. Elle est basée sur la mesure des composés polyphénoliques qui sont des métabolites secondaires produits par la plante lorsque celle-ci subit un stress (Goffart et coll. 2008). Ces composés polyphénoliques ont des régions de pics d'absorption UV-A et UV-B (Cerovic et coll. 2002). Ainsi, les valeurs d'absorption UV de la feuille sont directement corrélées avec la concentration en polyphénols dans les tissus. Le Dualex (Force-A, Orsay, France) est un instrument de mesure développé selon cette technologie. Il est portable et les mesures se prennent en pinçant les feuilles, comme pour le SPAD. Bien que des résultats concluants aient été obtenus avec le maïs, l'avoine et la fraise, cette technologie est toujours à l'étude avec la pomme de terre (Ziadi et coll. 2012) puisqu'actuellement il n'y aurait aucun avantage à l'emploi de cet outil en comparaison du SPAD (Parent et coll. 2008).

8.2.2.3 Mesures de la réflectance des feuilles (Multispectral Leaf Reflectance)

Plus récemment, des approches utilisent des capteurs ou l'imagerie aérienne ou satellite pour mesurer la réflectance de la lumière d'une feuille ou de la canopée pour calculer la NDVI (Différence normalisée d'indice de végétation) qui sert d'indicateur de vigueur des plants et de leur capacité à absorber le N. Il devient alors possible d'évaluer le statut azoté de tout un champ sans contact direct avec la feuille. Le « Greenseeker » ou « Hydro N Sensor » sont des capteurs à application commerciale de cette méthode qui s'installent sur le tracteur et qui permettent de cartographier la variation du statut N à l'échelle d'un champ de pomme de terre (Zebarth et coll. 2003). Bien que le premier serait légèrement plus précis que le second (Wendroth et coll. 2007), en Belgique, le « Hydro N Tester » a été spécifiquement testé pour la pomme de terre et a démontré un potentiel intéressant pour prévoir les rendements de 10 sites commerciaux non-irrigués (Olivier et coll. 2006). Enfin, il est récemment possible de combiner des approches d'imagerie (drones ou satellite) de type multispectral à haute résolution et des modèles pour estimer par exemple la teneur en chlorophylle de toute la canopée. C'est d'ailleurs une approche qui fonctionne bien pour la pomme de terre lorsque la canopée est homogène, mais qui sera moins efficace en début ou fin de croissance (stade défanage) (Botha et coll. 2007). Bien

calibrée, cette approche permettrait d'expliquer jusqu'à 76 % de la variabilité des rendements en tubercules, 55 jours après la plantation (Morier et coll. 2015).

8.2.3 Tests génétiques

La réponse des plantes aux stress abiotiques est contrôlée par des changements dans l'expression des gènes (Hazen et coll. 2003; Schnable et coll. 2004; Schmid et coll. 2005). Ainsi, des études récentes ont permis d'identifier des expressions génétiques spécifiques en réponse à un ou plusieurs stress abiotiques ou à des carences nutritives (Amtmann et coll. 2005; Swindell 2006; Schachtman et Shin 2007). Par exemple, un gène codant une enzyme nitrate réductase a été identifié et son expression pourrait être quantifiée pour exprimer un changement du statut azoté de la plante après seulement quelques jours (3 jours) d'imposition de carence en N (Li et coll. 2010). De même, un gène transporteur d'ammonium trouvé chez le cultivar Shepody serait autant, sinon plus efficace que la méthode de détection des teneurs en nitrate des pétioles ou celle des teneurs en chlorophylle du SPAD-502 pour déterminer le statut azoté du plant (Zebarth et coll. 2011). La quantification des expressions génétiques pourrait donc permettre de statuer plus rapidement et précisément sur l'état azoté des plants que les méthodes chimiques et optiques qui donnent des mesures indirectes de ce statut (Olfs et coll. 2005). Toutefois, malgré des résultats prometteurs, les applications pratiques des tests génétiques sont encore limitées pour des raisons économiques et parce qu'il n'existe encore aucun protocole officiel d'utilisation (Luo et coll. 2011).

8.3 Modélisation du statut azoté

Pour réussir à établir une recommandation en N globale à l'échelle d'un champ qui regroupe le calcul de la balance en N, mais également des simulations de la croissance de la culture et des conditions climatiques, des approches par modélisation sont actuellement en développement (Goffart et coll. 2008). Pour la pomme de terre uniquement, plus d'une trentaine de modèles ont été traités dans la littérature (Raymundo et coll. 2014). Récemment, Morrissette et coll. (2016) ont ainsi validé la performance du modèle STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard) qui a été développé par l'INRA (Institut national de recherche agronomique (France)), en le testant pour la pomme de terre à l'Île-du-Prince-Édouard et au Nouveau-Brunswick pour le cultivar Shepody et au Québec pour le cultivar Russet Burbank. Il s'agit d'un modèle sol-plant qui simule les dynamiques du C, de l'eau et du N (lessivage du NO_3 et prélèvement en N) pour de multiples cultures et systèmes de culture. L'étude a conclu que le modèle était efficace pour simuler les rendements et le prélèvement en N de la biomasse totale ou des tubercules. Par contre, pour plus de précisions et surtout pour mieux prévoir les pertes de nitrate par lessivage, le modèle doit être calibré selon le cultivar choisi et davantage d'essais seront nécessaires. Un autre modèle développé au Québec (Agriculture et Agroalimentaire Canada) pour le maïs-grain, mais qui pourrait être adapté pour la pomme de terre et qui attire l'attention ces temps-ci, est le modèle SCAN d'optimisation de la fertilisation N. Cet outil montre

qu'il est possible de combiner les modèles de prévisions météorologiques à des caractéristiques locales de sols et de cultures pour mieux prévoir les besoins en N au fractionnement à chaque année (Tremblay et coll. 2014). Également, pour se départir de la nécessité de requérir à un nombre impressionnant de paramètres pour calibrer les modèles, des chercheurs se sont penchés sur des alternatives comme les réseaux de neurones utilisant des fonctions non linéaires pour prédire les rendements en tubercules au Québec (Fortin et coll. 2010). Toutefois, il demeure que la majorité des modèles s'appuient sur différents paramètres pour lesquels les outils de mesures (tests chimiques, optiques…) présentent encore des précisions variables. Ainsi, cette source d'incertitude, additionnée à celle des risques d'erreurs de calibration des modèles, réduit à ce jour la fiabilité de cette technologie, d'où les besoins en recherche encore importants et leur utilisation peu répandue (Jiang et coll. 2011; van der Laan et coll. 2014).

8.4 Fertilisation de précision

Malgré la connaissance des variations spatiales intra-champ dans la demande en N, la norme est toujours à l'application de doses uniformes de N sur toute la superficie. La fertilisation de précision qui vise à ajuster les applications de N au patron des besoins est donc peu rentabilisée. Le fait que cette stratégie soit complexe à réaliser et demande des équipements spécialisés coûteux explique en bonne partie qu'elle soit toujours peu répandue. Elle implique en effet de connaître les recommandations spécifiques à chaque site et d'avoir accès à des services et aux outils permettant de mesurer la variabilité spatiale des concentrations en N minéral du sol, ainsi que des concentrations en N provenant de la minéralisation pendant la saison de croissance (Zebarth et coll. 2009). Deux grandes approches ont été testées au Québec. La première consiste à identifier des zones de gestion du N et la deuxième utilise une approche d'application du N à taux variable. Dans les deux cas, toutes les connaissances spécifiques doivent être géoréférencées pour être analysées d'un point de vue agronomique et pour y adapter les pratiques culturales.

L'approche par zones consiste à identifier des parcelles (*i.e* zones) homogènes et stables dans le temps pour lesquelles la gestion du N est adaptée (Cambouris et coll. 2014). La délimitation des parcelles est souvent basée sur les propriétés du sol en utilisant des cartes, un échantillonnage intensif de sol et des données de topographie à partir de cartes aériennes ou satellites. Elles peuvent également être délimitées sur la base d'informations obtenues de la culture, tels les rendements, l'échantillonnage des tissus en saison ou l'utilisation d'outils optiques. Toutefois, il demeure que la réponse de la culture peut être variable en fonction des conditions environnementales, à l'intérieure même d'une zone jugée homogène (Cambouris et coll. 2006; 2007). À l'inverse de l'approche par zones qui sont fixes dans le temps, l'approche à taux variables utilise la variation spatiale de certains paramètres pour apporter des applications variables de N dans le temps. Tout comme l'approche par zones, elle peut être basée sur les paramètres de sol (ex: la conductivité électrique), mais elle s'avère plus efficace lorsque basée sur les paramètres de la culture (ex : teneur en chlorophylle de la canopée) (Zebarth et coll. 2009). Elle permettrait de réduire le lessivage du NO_3 en saison en comparaison d'une

application uniforme de N (Whitley et Davenport 2003), mais elle présente plusieurs défis pratiques et technologiques, car un nombre important de valeurs doivent être compilées pour générer des cartes d'application précises et justes. De plus, il n'est pas nécessairement possible de suivre les recommandations d'application. Ainsi, il pourrait être avantageux de combiner les deux approches. ***Des zones pourraient être aménagées en fonction du taux de MO du sol. Ensuite, 50% de la dose visée serait appliquée et la signature spectrale des plants serait inspectée par drones ou satellite. Cela permettrait ensuite de cartographier le champ en fonction du statut azoté des plants et de moduler les apports de N en conséquence lors de fractionnements*** (Cambouris 2016 [comm. pers.]).

Afin d'améliorer le succès et l'adoption de l'agriculture de précision, davantage de recherche est donc nécessaire pour développer des tests plus efficaces pour prédire de façon détaillée la capacité du sol à fournir du N par minéralisation. Il faudra aussi être en mesure de combiner ces connaissances à des simulations de croissance de la culture basées sur des systèmes de prévisions météorologiques et de variations spatiales et temporelles du sol (Cambouris et coll. 2014). ***D'autres points devront également être considérés, comme l'adaptation de cette pratique lorsque plusieurs cultivars aux besoins variables sont cultivés dans un même champ*** (Parent 2016 [comm. pers.]). Néanmoins, l'intérêt de ce champ d'expertise est grandissant. En Europe, avec l'implantation de la «Directive nitrate», l'utilisation maximale des nutriments disponibles prend de plus en plus d'importance et les agriculteurs sont de plus en plus interpelés par de nouvelles technologies comme l'agriculture de précision (Vos 2009).

9. Maximiser les prélèvements du N apporté

9.1 Cibler le bon moment des apports

En gestion de la fertilisation, synchroniser la disponibilité du N des engrais avec les besoins de la plante pour en maximiser le prélèvement et l'efficacité d'utilisation est un objectif primordial (Errebhi et coll. 1998 ; Westerman 2005; Hopkins 2008). Bien que le concept soit simple, il est toutefois difficile à appliquer, car cette période est différente selon les cultivars et selon les années, puisque les conditions climatiques et de sol influencent le rythme de développement à chaque saison. Néanmoins, il demeure que les cultivars hâtifs auront des pics de besoins plus tôt dans la saison que les cultivars tardifs (Hopkins et coll. 2008). Peu importe le cultivar, les besoins en N varient également selon le stade de croissance de la plante. De façon générale, jusqu'à 30 jours après la plantation (JAP), la croissance du plant est soutenue par les réserves contenues dans la semence (Alva 2004). Par la suite, la croissance végétative active débute et se poursuit pendant 20-25 jours, soit jusqu'au début de l'initiation des tubercules. Une disponibilité en N adéquate est tout particulièrement importante à ce stade. Par contre, une application excessive de N avant ce stade peut favoriser le lessivage et la croissance des fanes au détriment de celle des tubercules (Allen et Scott 1980). Au Québec, plus spécifiquement, les prélèvements en N plafonnent vers 80 JAP (cv Goldrush) et la maturation se poursuit jusqu'à 130 JAP selon les

cultivars. De plus, jusqu'à 55% des prélèvements totaux en N peuvent déjà être complétés à la floraison (Landry et Boivin 2014a). Il devient donc essentiel d'ajuster les apports de N en fonction des spécificités de développement du cultivar planté. Fréquemment, aux États-Unis, seulement 25 à 50 % de la dose totale de N est appliquée entre la plantation et l'émergence. La quantité et le moment des applications subséquentes de N sont basés sur des mesures hebdomadaires des contenus en NO_3 des pétioles. Ce type d'application permet d'accroître les prélèvements en N (Hopkins et coll. 2008). Puisque les premiers 40 jours présentent un risque critique de lessivage, en limitant ainsi les applications de N à 50 % (idéal 25-30 %) des besoins à la plantation, on vient limiter les risques de pertes. ***Au Québec par contre, ce type d'application n'est pas courant car il serait fréquent de ne pouvoir réappliquer au bon moment la dose fractionnée, en raison des conditions climatiques, ce qui se traduit par des pertes de rendement*** (Cambouris 2016 [comm. pers.]). Ainsi, 50% et plus des besoins sont normalement apportés à la plantation. Lors de printemps pluvieux, les risques de pertes par lessivage peuvent alors être importants en plus de reporter la question à savoir si l'on doit réappliquer du N et dans quelle mesure, par exemple, lors de précipitations abondantes.

9.1.1 Le fractionnement des apports de N

Dans une majorité des entreprises de production de pommes de terre au Québec, le N est apporté sous forme granulaire et fractionné entre la plantation et le renchaussage. Cette pratique a démontré l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du N par la pomme de terre (Maidl et coll. 2002), tout particulièrement en situation de risques élevés de lessivage, comme dans les sols sableux (Cambouris et coll. 2007) ou les cultures irriguées (Errebhi et coll. 1998). La philosophie derrière cette pratique consiste à diminuer l'horizon de prédiction des besoins en N, d'une saison de croissance complète à une partie de celle-ci (Vos 1999). Subséquemment, en une ou deux occasions pendant la saison de croissance, une évaluation du statut azoté de la culture ou du sol devrait être réalisée pour ajuster judicieusement les apports fractionnés (Vos 2009). ***Dans la pratique au Québec, pour des questions de coûts et de temps, au moment du fractionnement aucune évaluation du statut azoté de la culture n'est effectuée préalablement (Perreault 2016 [comm. pers.]). Lors de printemps présentant des risques de lessivage élevés, en l'absence d'azote à dégagement contrôlée, le fractionnement peut donc effectivement limiter les risques de pertes d'azote contrairement à apporter la dose complète à la plantation. Cependant, le choix de la dose optimale à appliquer au fractionnement peut être sujet à plusieurs facteurs. (Perreault 2016 [comm. pers.]).*** De plus, bien qu'il demeure une pratique recommandée, il faut souligner que le fractionnement ne permet pas toujours d'optimiser les prélèvements en N et que son efficacité à limiter le lessivage est de moindre importance lorsque les risques sont faibles entre la plantation et le moment du fractionnement (Zebarth et coll. 2009). Par exemple, dans un essai réalisé au Minnesota, lors d'une année de pluies abondantes en début de saison, les concentrations de NO3 lessivé de la surface du sol à plus de 140 cm de profondeur se sont accrues de 84, 111 et 157 % en lien avec des apports croissants de N à la plantation, en comparaison au témoin non fertilisé en N. Par contre, lors de l'année suivante présentant moins d'événements pluvieux en début de saison, le même accroissement de doses

à la plantation n'a expliqué seulement que 1, 25 et 35 % des hausses du lessivage, en comparaison du témoin (Errebhi et coll. 1998). Par ailleurs dans certaines régions, à cause du climat, la majorité du lessivage du NO3 se produit à l'extérieur de la saison de croissance, comme c'est le cas dans l'est du Canada (Milburn et coll. 1990, 1997; Bélanger et coll. 2003). Ainsi, le fractionnement a peu d'impacts positifs sur l'efficacité d'utilisation du N lorsque les précipitations sont normales (Porter et Sisson 1993; Zebarth et coll. 2004b,c). De plus, certaines années lors de sécheresses, si les prélèvements en N sont limités au moment du fractionnement, cette pratique peut même réduire l'efficacité d'utilisation du N (Zebarth et coll. 2012), contrairement à une seule application au printemps (Munoz et coll. 2005).

9.1.2 La fertigation

Lorsque la culture est irriguée, la segmentation des apports de N par fertigation peut s'avérer une pratique intéressante puisque les fertilisants solubles et directement assimilables peuvent être étalés sur plusieurs épisodes d'irrigation. D'autant plus que les solutions azotées ne semblent pas avoir tendance à colmater les systèmes d'irrigation (Hartz et Hochmuth 1996). Lorsque pratiqué au bon moment, ce fractionnement hausse le taux d'utilisation du N et permet de réduire la quantité totale nécessaire de N à appliquer sans nuire au rendement (Badr et El-Yazied 2007). En production de tomates, la fertigation a ainsi été rapportée comme permettant d'utiliser seulement 60 à 80 % de la dose recommandée de N, en plus d'augmenter le rendement et la qualité des fruits grâce à une efficacité accrue d'absorption de l'eau et des nutriments par les racines (Gupta et coll. 2007). Le même concept s'applique également aux productions de pommes de terre, où l'application de N pourrait être réduite à 75 % de la dose recommandée (Patel et coll. 2011). En augmentant la fréquence des épisodes de fertigation, la quantité d'eau dans le sol demeure plus constante, ce qui fait diminuer les variations de concentration en nutriments dans le sol. Ceci maintient leur disponibilité sur une plus grande plage de temps et facilite leur absorption par les racines, diminuant leur perte, dont le lessivage du nitrate dans le cas du N (Badr et El-Yazied 2007).

Dans la pratique, tant les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte que par pivot sont adéquats pour fertiguer. Le système goutte-à-goutte permet toutefois de fournir le N directement dans la zone racinaire. Comme le N est alors mieux placé par rapport aux racines, la probabilité que le NO_3 se retrouve au-delà de la zone racinaire est plus faible (Darwish et coll. 2003). Lorsque l'aspersion par pivot est employée, la croissance des plants crée en saison un effet «parapluie» faisant en sorte que l'eau et son contenu en N ont tendance à se retrouver dans l'entre-rang. Dans un essai réalisé en 2015 au Québec dans une culture de pommes de terre (cv Goldrush) fertiguée par pivot (Landry et Boivin 2016), il a toutefois été démontré qu'il est possible de diminuer les apports totaux de N en remplaçant une partie des apports au renchaussage par trois épisodes de fertigation entre le renchaussage et le défanage. Les auteurs visent à étudier subséquemment le moyen de mieux utiliser la partie N se retrouvant dans l'entre-rang.

Quel que soit le système adopté, la réduction de doses a avantage à être réalisée par une diminution de la teneur en N de chacune des irrigations, plutôt que par une réduction du nombre d'épisodes d'apport (Hartz et Hochmuth 1996; Badr et El-Yazied 2007; Alva et coll. 2012). De plus, la gestion des épisodes devrait se baser sur des outils de gestion validés, comme la tensiométrie ou des modèles de simulation, lorsque le climat est caractérisé par des précipitations abondantes (Zhou et coll. 2015), comme au Québec. Enfin, au Québec, l'application conventionnelle d'une partie des besoins en N sous forme d'engrais minéraux à la plantation demeure recommandée comme marge de sécurité (Lang et coll 1981; Alva et coll. 2012; Landry et Boivin 2014b) puisque les conditions de précipitations abondantes qui peuvent prévaloir sont souvent un frein à l'apport de N par fertigation lorsque les plants n'ont pas besoin d'eau supplémentaire (Landry et Boivin 2016).

9.2 Cibler le bon endroit des apports

Les modes d'application de l'engrais au Québec varient de à la volée, en bande, foliaire, voire même en applications aériennes (Cambouris 2016 [comm. pers.]). Puisque les racines des pommes de terre à 30 cm de profondeur seront plus actives à prélever l'eau et le N que celles plus en surface (Asfary et coll. 1982) et que la longueur et la répartition du système racinaire, plus que sa biomasse totale, sont de meilleurs indicateurs des taux de prélèvement en N (Sattelmacher et coll. 1990), le placement de l'engrais est important pour optimiser les prélèvements. L'application en bande à une profondeur adéquate près de la semence, contrairement aux applications à la volée, peut donc venir améliorer les prélèvements en N de 28 % (Westermann et Sojka 1996). Cela concentre le nutriment près de la semence, surtout pendant les premiers 50 jours de croissance, période à risque élevé de lessivage alors que les prélèvements sont moindres étant donné la taille des plants. Néanmoins, l'application en bande à l'aide d'un épandeur conventionnel est normalement réalisée de chaque côté (7,5 cm) et à 5 cm sous le planton. Ce positionnement pourrait s'avérer trop superficiel puisqu'il favoriserait une concentration accrue de NO_3 au sommet de la butte par une remontée capillaire du NO_3 due à l'évaporation de l'eau du sol ou à la minéralisation du N du sol (Zebarth et Milburn 2003). De plus, avec ce type de placement, le sol des buttes renfermera une grande quantité de N inorganique, mais pas celui du sillon, ce qui se traduit par une importante variation horizontale de la concentration en N (Zebarth et Milburn 2003). Cette importante variation peut résulter par des pertes de NO_3 au centre de la butte et des carences vers l'entre-rang. Tout particulièrement en saison, lorsque le système racinaire se densifie et rejoint justement le sillon puisque l'eau s'y retrouve à cause de l'effet parapluie des plants. La recherche et le développement sont donc toujours de mise vis-à-vis les modes de placement des engrais pour les optimiser davantage. ***Par exemple, l'ameublissement et la fertilisation de l'entre-rang au renchaussage pourrait permettre au système racinaire de venir coloniser cette zone sous-exploitée afin de favoriser une meilleure utilisation des terres en culture de pommes de terre (Boivin et Landry 2016 [comm. pers.]).***

10. Maximiser les prélèvements du N par l'irrigation

L'irrigation est une des pratiques culturale les plus significatives à considérer dans la gestion du N, car elle a un impact majeur sur plusieurs aspects de sa disponibilité, de son taux de prélèvement et de ses pertes. En effet, elle agit directement sur les mécanismes de transport, de minéralisation du N_o, d'équilibre entre les formes inorganiques et d'absorption racinaire du N.

Ainsi, la teneur en eau du sol influence les taux de nitrification, de dénitrification et de volatilisation du N (Germont et Couton 1999). En cas de sol saturé, l'équilibre passera du NO_3^- vers le NO_2^-, puis le NH_4^+, menant à la dénitrification et à la perte de N par volatilisation (N_2O, N_2, NH_3). Dans les sols cultivés, généralement bien drainés, l'aération est suffisante pour empêcher des pertes importantes par ces processus. Celles-ci sont donc en général sous les 10 kg N/ha/an (Hénault et Germon 1995). Par contre, en contexte irrigué, cette dénitrification peut être fortement accrue. Les pertes de N par dénitrification peuvent débuter aussitôt que 15 minutes après la saturation du sol en eau, et cela dès que l'eau occupe 60 % ou plus des pores (IPNI 2015). Des pertes de N dépassant 200 kg N/ha ont ainsi pu être mesurées sur un seul mois d'été en Californie dans les cultures irriguées (Germont et Couton 1999). La teneur en eau du sol influence aussi le taux d'activité des micro-organismes impliqués dans la minéralisation du N_o en NO_3 (Skopp et coll. 1990) et donc la capacité de fourniture en NO_3 du sol où 92-97 % du N total est sous forme de N_o (Stevenson 1985; Baldock et Nelson 2000). Dans une étude d'incubation de divers sols minéraux en culture de la région du Mont-Saint-Bruno au Québec, Leblanc (2009) a démontré que les taux de minéralisation du N_o étaient corrélés à 85 % avec la réserve en eau utile (RU) du sol. Le maximum de minéralisation a lieu quand la capacité de rétention en eau du sol se situe entre 60 et 80% (Scheffer 1976). Une fois sous forme de NO_3, le mouvement de cet ion dans le sol est ensuite régulé à 99 % par le transport convectif de l'eau (mass flow), qui peut se faire sur plusieurs mètres (Havlin et coll. 2005). Le transport convectif est lui-même contrôlé par le bilan hydrique (Tisdale et coll. 1985). Dans les sols à pommes de terre, sableux et le plus souvent bien aérés, cet aspect devient majeur puisque la quasi-totalité du N des engrais se retrouvera sous la forme NO_3. Enfin, pour être absorbé par les racines, le NO_3 doit être en solution dans l'eau avec laquelle il est absorbé par transport actif (Morot-Gaudry 1997). La disponibilité adéquate en eau est donc, intimement liée aux prélèvements de NO_3 par la plante (Henry et Hogg 2003).

L'irrigation a aussi un effet indirect sur les prélèvements de N, car une culture disposant d'une quantité d'eau optimale aura un développement accru et donc des besoins en N plus importants. Inversement, si la croissance de la plante est limitée par un stress hydriques, les prélèvements en N s'en trouveront diminués. Cette relation entre la nutrition hydrique et minérale est d'ailleurs réciproque. Puisque le N est le facteur clé de production de la biomasse des cultures, la présence de quantités suffisantes de N augmente le développement de la

culture et donc, ses besoins en eau (Boivin et Landry 2011b; Landry et Boivin 2014a). Ces deux éléments devraient ainsi toujours être gérés de concert.

La disponibilité de l'eau dans le sol en un point précis et le patron de distribution de ces zones à l'échelle du champ influencent aussi le développement du système racinaire, tant sa localisation que sa densité. Un système racinaire bien développé entraîne une meilleure interception du NO_3. Par exemple, il a été démontré dans un essai d'irrigation des cultivars de pommes de terre Norland et Russet B. (Portneuf) (Boivin et Landry 2011a) qu'en présence d'irrigation, la longueur racinaire est augmentée et que la consigne d'irrigation employée a eu une influence en elle-même. Ainsi, les plants irrigués ont développé une longueur racinaire beaucoup plus importante que celle des plants non-irrigués. Cette différence était de 1,8 x lorsque l'irrigation était déclenchée à la consigne de 50 % de la RU, et de 1,35 x en moyenne sous la consigne à 65 % de la RU.

Lorsqu'elle est pratiquée adéquatement, l'irrigation permet ainsi d'accroître significativement le lien entre la fertilisation N et la production du rendement final (Fig. 3). Autrement dit, l'irrigation renforce l'impact de la fertilisation N sur les rendements et incidemment, sur la rentabilité de chaque dollar investi en engrais N. La compilation des taux d'utilisation du N (TUN) des engrais mesurés lors de plusieurs projets de recherche (184 parcelles) réalisés entre 2007 et 2013 dans la région de Portneuf sur le lien entre la fertilisation N et l'irrigation en pommes de terre a effectivement démontré que la force du lien entre le TUN et le rendement passait de R^2 = 63 % en absence d'irrigation, et à R^2 = 79 % pour les cultures irriguées (Landry 2015). L'impact de l'irrigation est encore plus grand sur les TUN partiels mesurés plus tôt en saison, à la floraison (Fig. 4). Ainsi, en l'absence d'irrigation, il n'y a aucun lien entre le TUN des engrais fait par la culture au stade floraison et le rendement final produit (R^2 = 0,02 %), tandis qu'un lien de R^2 = 51 % était déjà présent pour les cultures irriguées. Ainsi, malgré une fertilisation N identique, une culture bénéficiant d'apport en eau au moment opportun aurait une corrélation rendements x TUN des engrais plus forte que la même culture non-irriguée, et ceci est vrai pour plusieurs cultivars commerciaux (Landry 2015). Ce résultat concorde avec le fait que la période entre l'émergence et la floraison est tout particulièrement réceptive à la disponibilité optimale d'eau dans le sol, ce qui favorise une meilleure utilisation des apports en N (Boivin et Landry 2010).

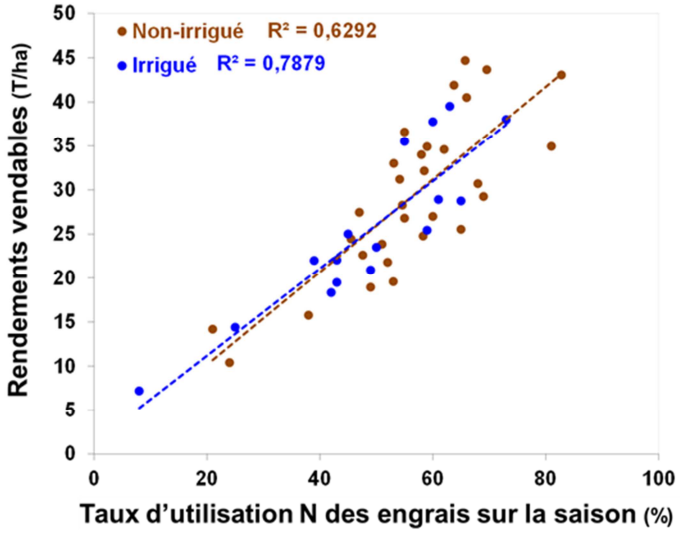

Figure 3 : Lien entre le taux final d'utilisation du N des engrais (plantation + fractionnement) et le rendement vendable de divers cultivars (Goldrush, Norland, Russet B. et Nodora) (2007-2013) soumis à une régie d'irrigation raisonnée (bleu) ou non-irriguée (brun). (Adapté de Landry 2015)

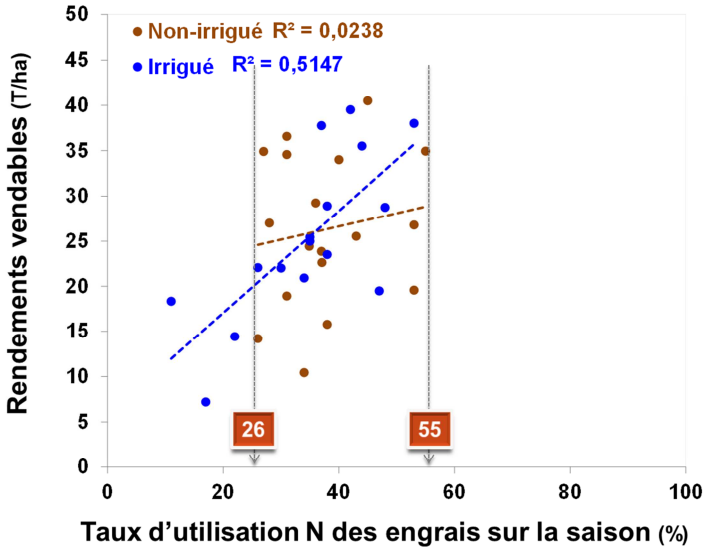

Figure 4 : Lien entre le taux d'utilisation du N des engrais (plantation) au stade floraison et les rendements vendables pour divers cultivars (Goldrush, Norland, Russet B. et Nordonna) (2007-2013) soumis à une régie d'irrigation raisonnée (bleu) ou non-irriguée (brun). (Adapté de Landry 2015)

À l'opposé, l'absence de régie raisonnée peut occasionner des pertes très importantes, par lessivage surtout, ou par dénitrification (Alva et coll. 2006; Shock et coll. 2007; Boivin et coll. 2008) et augmenter les coûts de production dus à l'application plus importante de fertilisants (Shock et coll. 2007), en plus de diminuer les rendements (King et Stark 1997; Boivin et coll. 2008). Par exemple, dans le cadre d'un projet évaluant l'impact de la consigne d'irrigation basée sur la RU du sol suivie par tensiométrie en culture de pommes de terre (Portneuf), des teneurs en NO_3 importantes ont été mesurées dans les eaux de lessivage des parcelles régies avec la consigne à 65 % de la RU, comparativement à celles suivant la consigne à 50 % (Fig. 5 et 6). De plus, la consigne à 50 % a favorisé un meilleur TUN des engrais, ainsi que de meilleurs rendements (Boivin et Landry 2011a).

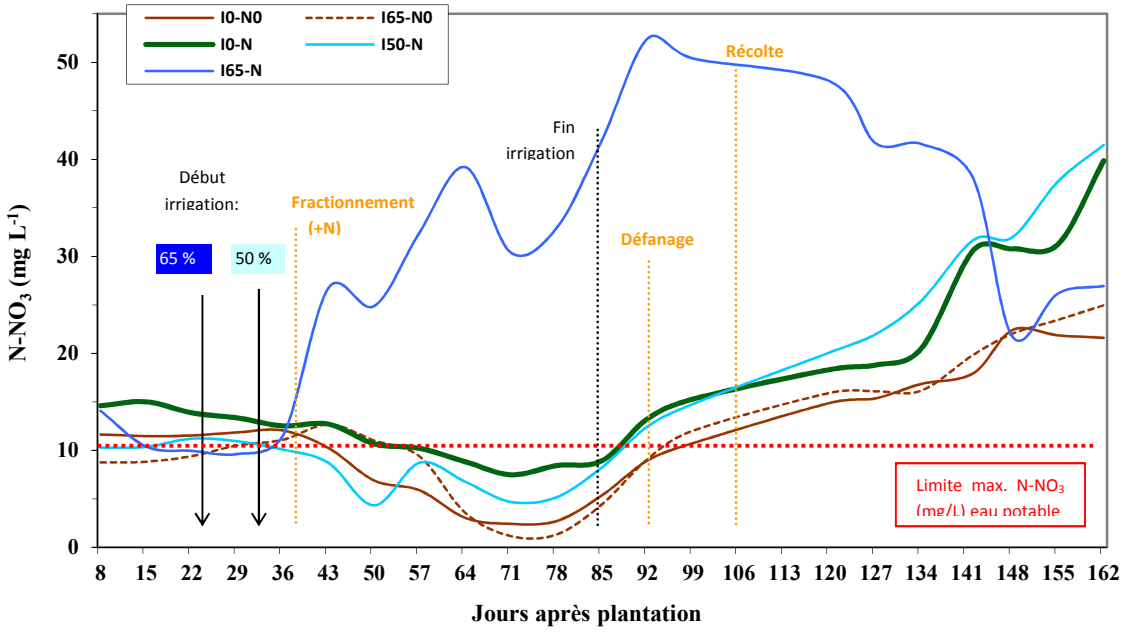

Figure 5. Teneurs en NO_3-N dans l'eau des lysimètres selon la consigne d'irrigation (réserve en eau utile (RU) de 65 % ou 50 %) pour le cultivar Norland en 2010 (I : irrigué, I0 : non irrigué, N : fertilisé en N, N0 : non fertilisé en N). (Boivin et Landry 2011a).

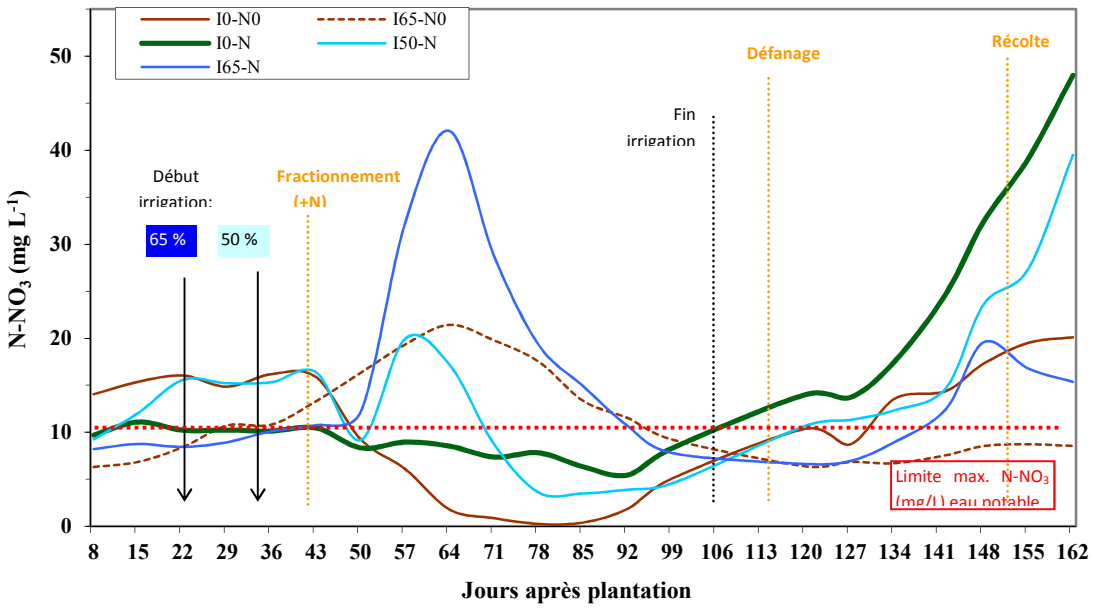

Figure 6. Teneurs en NO_3-N dans l'eau des lysimètres selon la consigne d'irrigation (réserve en eau utile (RU) de 65 % ou 50 %) pour le cultivar Russet B. en 2010 (I : irrigué, I0 : non irrigué, N : fertilisé en N, N0 : non fertilisé en N). (Boivin et Landry 2011a).

Considérant qu'une proportion déjà importante de producteurs de pommes de terre irrigue leurs cultures et que l'adoption de cette pratique est en constante progression, il devient important que ceux-ci adoptent une régie raisonnée de l'irrigation. Pour ce faire, ceux qui envisagent de s'équiper devraient être conseillés et accompagnés dans cette démarche par des agronomes spécialisés en irrigation puisque tous les types de sol ou toutes les régions agricoles du Québec ne se prêtent pas nécessairement à l'irrigation ou à une irrigation soutenue. Pour les producteurs qui ont déjà d'un système d'irrigation, la régie est souvent pratiquée « à l'instinct ». En effet, bien que les producteurs bénéficient d'une expertise importante concernant la protection phytosanitaire et la gestion de la fertilisation au Québec, peu de ressources sont disponibles en support à la régie de l'irrigation. En effet, l'offre de service conseil est une lacune. Pour cette raison, des conseillers en horticulture du MAPAQ et de Clubs Agroenvironnementaux, ainsi que des chercheurs de l'IRDA ont mis sur pied tout récemment un vaste projet pour développer une «Caravane de l'irrigation», soit une équipe mobile qui a un objectif de formation des intervenants en régie raisonnée de l'irrigation selon la spécificité des entreprises (Boivin 2016 [comm. pers.]). Il serait également très pertinent qu'un Guide de référence en irrigation soit rédigé sans délai pour le Québec.

10.1 Régie raisonnée : déclenchement des irrigations

Succinctement, la régie raisonnée de l'irrigation a pour finalité d'irriguer au moment optimal avec la bonne quantité d'eau afin de stabiliser ou même améliorer les rendements, tout en visant l'efficacité d'utilisation de l'eau et la réduction du risque de lessivage du NO_3. ***Pour ce***

faire, il est essentiel d'abord et avant tout, d'avoir une connaissance approfondie des propriétés chimiques et physiques des sols en culture et des besoins précis de la culture (Bergeron 2016 [comm. pers.]) et de s'appuyer sur des mesures objectives de gestion. Parmi les différents outils qui peuvent être utilisés il y a : le tensiomètre qui permet de mesurer localement le statut hydrique du sol; le bilan hydrique qui permet de comparer théoriquement l'eau perdue par évapotranspiration et les apports en eau qui sont valorisables par la culture; l'approche hybride combinant l'utilisation du bilan hydrique et quelques tensiomètres pour valider les données obtenues; la sonde TDR (*time domain reflectometry*) et l'imagerie thermique, utilisant des images acquises par une caméra installée sur un tracteur, un pivot, une rampe ou un drone, qui associe les variations thermiques du couvert végétal à des stress hydriques subis par la plante. Certains de ces outils, comme le tensiomètre et le bilan hydrique, sont de plus en plus utilisés avec succès chez différents producteurs. Pour sa part, l'approche hybride présente un grand potentiel pour une régie raisonnée de l'irrigation, puisqu'elle assure une bonne précision quotidienne du statut hydrique du sol et ce, à des coûts abordables pour une petite entreprise. De plus, c'est une méthode très efficace pour des cultures produites sur de grandes superficies, telle la pomme de terre (Boivin et Bergeron 2014; Shock et coll. 2006; Vallée et coll. 2013).

10.2 Irrigation de précision

Dans les régions arides et semi-arides, l'irrigation de précision, qui considère les caractéristiques spécifiques des différentes zones d'un champ pour irriguer (Shrestha et coll. 2010), se développe de plus en plus puisqu'elle permet d'économiser l'eau déjà rare. Cependant, dans les régions tempérées ou humides, comme au Québec, cette technologie demeure peu utilisée étant donné que l'irrigation est complémentaire au régime de précipitations. Celle-ci permettrait toutefois de diminuer le lessivage du NO_3 en évitant un excès d'eau dans les zones plus humides. En effet, puisqu'un champ est rarement homogène, une irrigation conventionnelle uniforme résulte en plusieurs sections trop irriguées (Daccache et coll. 2015). Cette réalité sera encore plus accentuée avec l'augmentation prévue des épisodes de sécheresse associés aux changements climatiques qui seront compensés par des irrigations plus fréquentes et des apports de N plus grands pour maintenir les rendements (Vashisht et coll. 2015).

L'accès à une offre de service adaptée aiderait sûrement les producteurs à se diriger dans cette voie qui ne demande pas d'équipements d'irrigation non disponibles au Québec. En effet, ***un pivot ou une rampe avec enrouleur à vitesse variable sont des systèmes très efficaces pour irriguer différentes sections de champs selon les caractéristiques locales du sol*** (Daniel Bergeron 2016 [comm. pers.]). Une telle expérience a été réalisée au Québec (Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier) dans un projet qui a démontré, par l'installation de 30 tensiomètres dans différentes zones d'un champ de 20 ha, que les teneurs en eau du sol étaient effectivement sujettes à des variations. Celles-ci suivaient des patrons bien structurés et stables d'année en année selon la topographie, la texture du sol et le contenu en MO (Boivin et coll. 2008), rendant

ainsi possible d'intervenir pour uniformiser les teneurs en eau du sol et la productivité de la culture. Ce projet avait demandé un multi-échantillonnage manuel exhaustif relativement coûteux du sol, mais d'autres techniques moins coûteuses existent pour déterminer les patrons de teneurs en eau. Par exemple, l'induction électromagnétique peut être utilisée pour numériser rapidement un champ et le subdiviser en différentes zones à des coûts peu élevés (Daccache et coll. 2015). Le LiDAR (light detection and ranging) est une autre technique abordable, évaluée avec succès dans le sud du Québec, qui permet de déterminer la variabilité spatiale des sols (Michaud et coll. 2009). Elle génère l'acquisition aérienne de données de relief par le biais de pulsations laser avec une précision verticale de 5 à 15 cm. La cartographie de cette variabilité se traduit par l'identification des zones les plus à risque de pollution diffuse et d'érosion, qui servent aussi par la suite à ajuster les irrigations.

10.3 Choix des équipements d'irrigation

Outre le mode de régie, le système employé pour irriguer a aussi une grande influence sur le risque de lessivage du NO_3. Le système goutte-à-goutte (GàG), la rampe à basse pression avec enrouleur, le pivot à basse pression et la rampe ou le pivot à taux variable sont des systèmes pour lesquels la culture utilise plus efficacement la quantité d'eau appliquée. Quant à eux, les systèmes par gicleurs, le pivot à haute pression et le canon à haute pression avec enrouleur sont plutôt des systèmes rendant l'utilisation de l'eau moins efficace par la culture (King et Stark 1997; Boivin et Bergeron 2014).

La grande efficacité du système GàG s'expliquerait en partie par une meilleure distribution de l'eau, appliquée directement dans la zone racinaire (Starr et coll. 2005; Ünlü et coll. 2006; Cooley et coll. 2010). Avec un système de gicleurs, l'eau a plutôt tendance à se retrouver dans les entre-rangs. L'érosion du sol (Shock et Shock 2012) et le lessivage du NO_3 dus aux irrigations diminuent d'ailleurs lorsqu'une culture est irriguée par un système GàG plutôt que par aspersion (Darwish et coll. 2003; Bruin et coll. 2010). Dans une culture de fraise à jour neutre (Île d'Orléans), l'ajout d'un 2e tube GàG dans la butte a permis d'obtenir une distribution plus uniforme de l'eau et des racines. De meilleurs rendements ont été obtenus durant les périodes de demande élevée en eau et cela a également contribué à diminuer le lessivage du NO_3 (Landry et Boivin 2014b). L'utilisation de deux tubes GàG a aussi permis d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau et du N et de diminuer le lessivage du NO_3 dans une production de zucchinis en Floride (Zotarelli et coll. 2008). ***Toutefois, le système GàG est davantage intéressant pour irriguer de petites superficies ou des champs de configuration irrégulière qui ne sont pas accessibles pour un pivot ou une rampe*** (Bergeron 2016 [comm. pers.]). Aussi, le GàG pourrait être intéressant lorsque le volume d'eau disponible pour l'irrigation est contraignant.

Le système GàG serait plus facile à rentabiliser avec des cultures où le revenu par unité de surface est très élevé. Une rampe ou un pivot à basse pression sont plus adaptés pour les systèmes culturaux en pommes de terre et permettraient tout de même de diminuer le

lessivage du NO_3, comparativement aux gicleurs, aux systèmes à haute pression (Boivin et Bergeron 2014) et au contrôle de la hauteur de la nappe phréatique (Liao et coll. 2016). Cette dernière méthode, peu utilisée au Québec, serait plutôt à proscrire, car elle résulte souvent en une perte importante d'eau et de nutriments par drainage due aux quantités d'eau nécessaires pour élever suffisamment la nappe phréatique. Au contraire, le recourt à un pivot permettrait d'économiser 55 % d'eau, sans faire diminuer le rendement (Liao et coll. 2016). Une rampe, tout comme le pivot à basse pression, est également intéressante puisqu'elle est plus accessible pour les producteurs. Elle permet tout de même d'obtenir de bons rendements et de diminuer le lessivage du NO_3, comparativement aux gicleurs, aux systèmes à haute pression (Boivin et Bergeron 2014) et au pompage de la nappe phréatique (Liao et coll. 2016). Enfin, quel que soit le système choisi, l'uniformité d'application de l'eau est importante à vérifier (Nadon et coll. 2016).

10.4 Choix du mode d'apport des quantités d'eau

Différents modes d'apport en eau permettent de jouer sur les quantités appliquées : l'irrigation déficitaire, l'assèchement partiel régulier, l'irrigation à capacité au champ (CC) ou une combinaison de ces approches.

L'irrigation déficitaire consiste à appliquer le volume d'eau permettant de ramener le statut hydrique du sol à 70% de la CC. L'assèchement partiel régulier consiste à irriguer un seul côté du plant à 70 % de la CC à chaque irrigation, laissant l'autre côté non irrigué (Shahnazari et coll. 2008). Les côtés irrigués et asséchés sont alternés après une période de cinq à dix jours, dépendamment du stade de développement de la culture et du bilan hydrique du sol (Kang et Zhang 2004). Ce type d'irrigation s'effectue souvent à l'aide d'un système par GàG qui compte deux tubes. Pour la culture de la pomme de terre, une variation de la technique de l'assèchement partiel régulier consiste à effectuer d'abord une irrigation à la CC en début de saison, puis un assèchement partiel pour les périodes comprises entre l'initiation des tubercules (environ 36 jours après l'émergence) et la maturité des plants. Divers essais menés en culture de pommes de terre avec cette technique hybride ont démontré qu'elle permet de maintenir et même d'améliorer les rendements et la qualité des tubercules, ainsi que l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les plants, en comparaison de l'irrigation régulière à la CC (Shahnazari et coll. 2008; Roosta et coll. 2009). Cette technique hybride favorise une consommation plus élevée de N par les plants laissant ainsi moins de N résiduel, comparativement à l'irrigation déficitaire effectuée tout au long de la saison (Liu et coll. 2015) qui rend plutôt le N moins disponible et entraîne un risque de diminution des rendements (Shahnazari et coll. 2008). Ce phénomène s'explique par le fait que l'assèchement partiel stimule le développement racinaire (Dry et coll. 2000). Une autre méthode mixte, ressemblant à celle de l'assèchement partiel suivant une période d'irrigation à la CC, a aussi permis d'améliorer le rendement (Ahmadi et coll. 2011). Elle consiste à irriguer le champ à 95 % de la RU durant les premiers stades de croissance de la pomme de terre, suite à quoi l'irrigation déficitaire est pratiquée suivant le stade d'initiation des tubercules. En fait, l'utilisation du N par les plants n'est pas différente pour

l'assèchement partiel ou l'irrigation déficitaire dans le cas où ces deux traitements ont lieu après une période d'irrigation à la CC. L'utilisation de l'azote par les plants, selon le type de traitement, diffère toutefois en fonction du type de sol, soit pour un sable grossier, un sable loameux ou un loam sableux. Dans toutes ces études, une irrigation à la CC était nécessaire dans les premiers stades de croissance, puis une irrigation déficitaire, déclenchée après avoir atteint un déficit en eau d'environ 30 % par rapport à la CC, pouvait être appliquée aux pommes de terre entre le stade d'initiation des tubercules et la récolte. Le déficit pouvait même être fixé à 50 % durant les cinq dernières semaines précédant la récolte (Pavlista 2015).

En laissant le sol s'assécher un peu avant d'irriguer à nouveau, par exemple en apportant moins d'eau mais plus souvent (King et Stark 1997; Bruin et coll. 2010; Cooley et coll. 2010), cela permet d'optimiser les rendements tout en diminuant le lessivage (Shock et coll. 2007). À l'opposé, un sol saturé d'eau pendant plus de dix heures peut créer des conditions anoxiques et induire des dommages aux racines (King et Stark 1997). Ainsi, bien que le volume d'eau à appliquer et que les consignes d'irrigation diffèrent d'une étude à l'autre, il y a un consensus sur le fait que le sol ne doit pas être trop humide ou trop sec, sans oublier que les premiers stades de croissance, soit les stades d'émergence et d'initiation et de début de croissance des tubercules, sont particulièrement sensibles au déficit hydrique. En effet, diminuer l'irrigation durant ces stades ou pendant la croissance active engendre une perte significative des rendements (Landry et Boivin 2014a). Bien que l'assèchement partiel soit une technique très efficace dans les régions plus arides pour diminuer le volume d'eau requis pour l'irrigation et ainsi diminuer le lessivage du nitrate, cette méthode est possiblement moins pertinente au Québec étant donné la quantité importante des précipitations reçues annuellement sur le territoire. En revanche, maintenir la tension de l'eau du sol à une certaine proportion de la RU du sol selon les différents stades de croissance, et ce, en tenant compte des précipitations attendues et du statut hydrique du sol, serait probablement une technique plus réalisable sous les conditions climatiques du Québec. **Aussi, irriguer plus fréquemment, mais avec un volume d'eau plus petit pour chaque irrigation, serait une pratique souhaitable pour diminuer le lessivage du nitrate** (Cambouris 2016 [comm. pers.]).

11. Maximiser les prélèvements du N par le choix des engrais

11.1 Formes : engrais conventionnels

Les types d'engrais commercial communément vendus pour la pomme de terre sont le nitrate d'ammonium (33,5-0-0), le sulfate d'ammonium (21-0-0), le di-ammonium phosphate (18-46-0) et le nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) dont les formes disponibles de N sont le NH_4^+ ou le NO_3^- (AFIC 2002). Comme le NO_3^- est la forme la plus potentiellement lessivable, les sources de NH_4^+ sont recommandées en sol sableux et permettraient d'obtenir de meilleurs rendements en situation propice au lessivage, comme avec les cultures irriguées (Bundy et coll. 1986). Cet effet serait par contre de très courte durée puisque dans les sols sableux bien aérés, contrairement

au sol plus lourd, l'ion NH_4^+ n'est pas retenu par les feuillets d'argile et il a tendance à s'y oxyder rapidement en NO_3^- (Kelling et coll. 2011). Par contre, le NH_4^+ sera plus sensible à la volatilisation (Shrestha et coll. 2010). Les formes contenant du NO_3^- seront donc plutôt recommandées lorsque le N peut être rapidement utilisé, comme lors du fractionnement alors que le système racinaire de la plante est bien développé (Munoz et coll. 2005). L'urée aurait quant à elle un délai de libération du NO_3^- beaucoup plus long que le NH_4^+, mais cette source n'est à peu près pas utilisée, car elle n'est pas conseillée à la plantation (CRAAQ 2010). En France, un groupe de chercheurs a par contre montré qu'il n'y avait pas de différence sur les rendements en pommes de terre entre l'emploi d'urée 46 ou de nitrate d'ammonium lorsque les applications avaient lieu avant le buttage et que l'urée était rapidement incorporée au sol pour éviter les pertes par volatilisation (Cohan 2014). Enfin, les formes de N ont des effets variables sur le taux de récupération du N par la plante selon les années, les conditions du sol et la météo (ex. contenu en MO du sol, pH, pluviométrie ou irrigation) (Bundy et coll. 1986; Sanderson et White 1987; Waddell et coll. 1999). Par exemple, lorsque les conditions d'humidité sont non restrictives ou lessivantes, le TUN du nitrate d'ammonium est supérieur de 10 % à celui du sulfate d'ammonium, bien que les deux formes permettent d'obtenir des rendements comparables (Cambouris et coll. 2015). Aux États-Unis, en sols sableux irrigués, le sulfate d'ammonium dans ces conditions permet alors des rendements en pommes de terre supérieurs de 5 % comparativement au nitrate d'ammonium et à l'urée qui pour leur part permettent des rendements comparables (Bundy et coll. 1986).

11.2 Technologie : engrais à libération contrôlée

Malgré l'emploi de multiples stratégies pour minimiser le lessivage du NO_3, des événements difficilement prévisibles et incontrôlables le favorisant peuvent toujours survenir en saison, comme d'importantes précipitations. Pour des apports similaires de N, les concentrations en NO_3 dans le profil de sol vont donc varier de façon importante entre une année avec peu de précipitations (2007) et une année avec beaucoup de précipitations (2008) (Fig. 7) (Boivin et Landry 2008). Les fabricants tentent donc de développer des engrais présentant une solubilité progressive ne demandant pas plusieurs applications en saison (Degaldo et coll. 1996; Hutchinson 2005; Munoz et coll. 2005) et qui améliorent l'efficacité d'utilisation du N par la plante (Hopkins at coll. 2008).

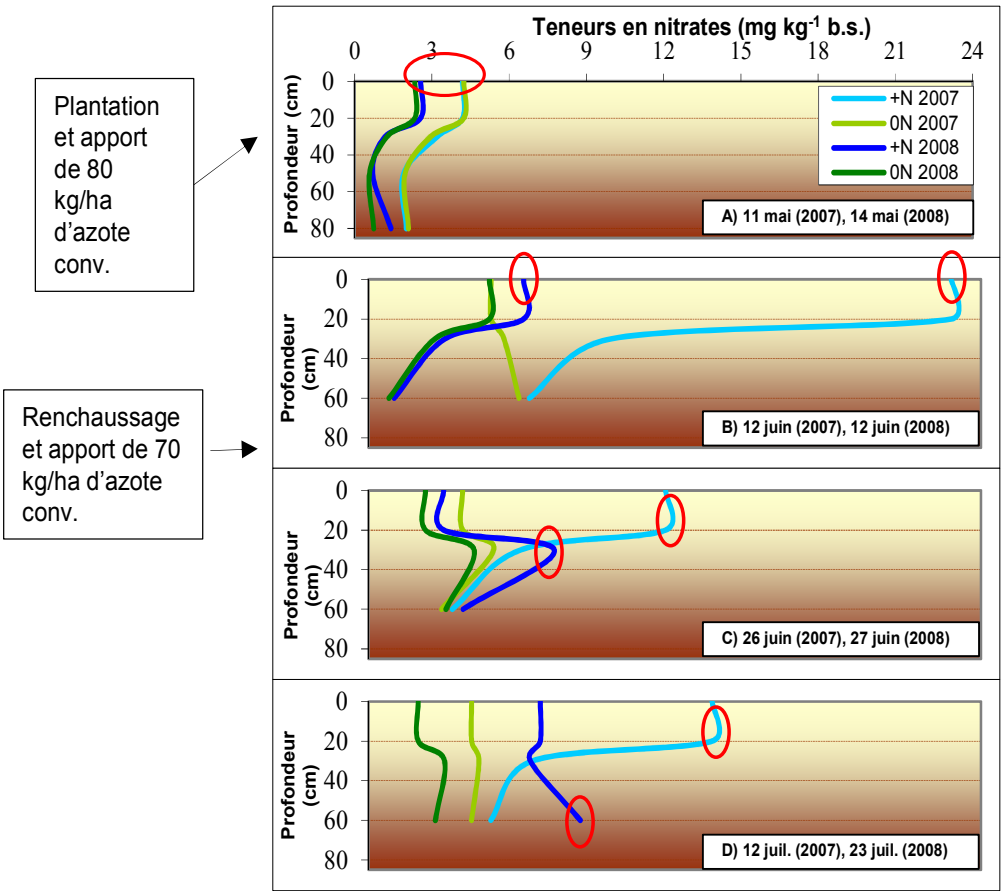

Figure 7. Comparaison de la dynamique des nitrates au travers du profil de sol entre des saisons avec précipitations faibles (2007) ou importantes (2008), dans un sol (sable loameux) cultivé en pommes de terre (cv. Goldrush) et irrigué de façon raisonnée à Deschambault, Québec. 0N : témoin non fertilisé, +N : fertilisé (adapté de Boivin et Landry 2008).

Ces technologies englobent deux grandes catégories; les engrais à libération contrôlée (ELC) et les engrais à libération lente (ELL). Les ELC sont des particules d'engrais soluble enrobées d'une barrière physique (sulfure, polymère, résine ou une combinaison des trois) faisant en sorte de rendre la libération du N graduelle, à une vitesse contrôlée le plus souvent par la température du sol, mais non par les apports d'eau. Il existe aussi des ELL qui relâchent plus lentement le N, car ils sont synthétisés à partir de composés de faible solubilité (ex. urée formaldéhyde, isobutilène diurée (IBDU) et triazines) et donc plus long à solubiliser (Guertal 2009). Toutefois, dans la culture de la pomme de terre, les ELC semblent vouloir se démarquer.

Les ELC permettent d'étaler la libération du N et de réduire le risque qu'il soit lessivé avant d'être prélevé (Simonne et Hutchinson 2005). Leur usage n'est pas nouveau en agriculture (Hopkins et coll. 2008), mais il est relativement récent en production de pommes de terre, car les premiers travaux avaient montré des résultats peu concluants. Leur coût initial était élevé et la libération du N mal synchronisée avec les besoins de la culture, ce qui retardait la tubérisation et causait des pertes de rendements (Simonne et Hutchinson, 2005). Toutefois, les ELC qui sont fait d'urée enrobée de polymère montrent un potentiel intéressant en culture de pommes de terre. Par exemple, le FRN/ESN (Agrium Advanced Technologies, Brantford, Ontario) a fait

l'objet de plusieurs essais récemment, dont certains au Québec. La libération du N de ce produit est contrôlée par la température du sol qui détermine la grosseur des pores par lesquels l'eau entre pour dissoudre l'urée et ressort sous forme de solution azotée. Ainsi, la dissolution n'est pas directement influencée par les apports en eau, ce qui est très utile pour les cultures irriguées (Trenkel 1997; Agrium 2016). L'emploi d'un tel engrais dans la pomme de terre permettrait des réductions de 34 % à 49 % du lessivage du NO_3 (Zvomuya et coll. 2003; Zvomuya et Rosen 2001), en plus d'accroître les rendements et l'efficacité d'utilisation du N (Shoji et coll. 2001). Au Québec, en culture de pommes de terre non-irriguée, l'utilisation du FRN a permis des rendements vendables en tubercules supérieurs avec une seule application à la plantation, en comparaison à des applications fractionnées de nitrate d'ammonium calcique, pour une dose comparable (150 kg N/ha) (Ziadi et coll. 2011). Il est démontré qu'une seule application de FRN à la plantation permet l'atteinte de rendements comparables aux applications fractionnées d'engrais conventionnels granulaires (ECV) (Konschuh et coll. 2010; Cambouris et coll. 2015), réduisant ainsi les coûts d'application (Mckeown 2010; Hyatt et coll. 2010). En contrepartie, lors d'une année sèche avec moins de croissance et donc moins de prélèvements en N, l'emploi de 150 kg N/ha de FRN laisse une plus grande concentration de NO_3 résiduel que le nitrate d'ammonium (Samson et coll. 2011). Des rendements comparables ont également été obtenus avec l'emploi de 150 kg N/ha de FRN appliqué totalement à la plantation en comparaison au nitrate d'ammonium calcique (CAN) fractionné en 2 applications (50 kg à la plantation et 100 kg au renchaussage) et les pertes de NO_3 par lessivage étaient comparables entre les deux, même lorsque qu'une irrigation était pratiquée (valeur médiane de 14,4 mg N-NO_3/L), ce qui démontre bien que la libération contrôlée du N au printemps permet de limiter le lessivage, à l'instar du fractionnement (Landry et Boivin 2013). De plus, dans différents sites au Canada et aux États-Unis, il a été possible d'apporter seulement 67 % à 75 % de la dose recommandée de N sous forme de FRN, en comparaison des ECV, et de maintenir des rendements comparables à la pratique conventionnelle (Lemonte et coll. 2009; Konschuh et coll. 2010; Bero et coll. 2014). Lors d'années à fort potentiel de lessivage ou en présence d'irrigations répétées, le FRN s'avèrerait donc un choix bénéfique, tant pour stabiliser les rendements que pour protéger l'environnement (Zvomuya et Rosen 2001; Zvomuya et coll. 2003; Cambouris et coll. 2015).

Une baisse de rendement et davantage de NO_3 résiduel dans le sol sont par contre associés à l'apport de FRN au renchaussage, à cause du délai de libération du N qui fait en sorte qu'une partie est relâchée trop tardivement pour être utilisée et demeure ainsi au sol à la récolte (Landry et Boivin 2013). Le délai de libération existe peu importe le moment d'application et varie en fonction des conditions météorologiques qui prévalent à chaque année (Guertal 2009; Fujinuma et coll. 2009). Ainsi, les printemps frais du Québec occasionnent probablement un délai de libération encore plus long que celui qui a été mesuré en pleine saison au fractionnement lors de l'essai de Landry et Boivin (2013). Une solution mixte qui sera testée au cours des étés 2017-2018 serait de ***combiner le FRN à une partie de démarreur d'engrais granulaire dont le N est immédiatement disponible à la plantation afin de contrer le délai de libération et de soutenir les premiers besoins en N de la culture*** (Landry 2016 [comm. pers.]). Ce projet sera également en lien avec d'autres données qui recommandent que le FRN soit

appliqué le plus près possible de l'émergence (LeMonte et coll. 2009 ; Agrium 2016). En effet, au Minnesota, des apports combinés de FRN et de diammonium phosphate (DAP) à la plantation ou l'émergence, plutôt qu'en pré-plantation, ont montré un meilleur TUN par la pomme de terre, en comparaison d'apports fractionnés de DAP à l'émergence et au renchaussage (65 % vs. 55 %), ainsi qu'une réduction des pertes par lessivage (Wilson et coll. 2010).

Les doses de N recommandées par la grille de référence ayant été établies avec des engrais ECV dont on assume par leur nature des pertes par lessivage, il sera important de déterminer quelles sont les doses adéquates d'apports à utiliser avec le FRN étant donné que pour sa part, la partie inutilisée demeurera au sol au-delà des prélèvements. D'autant plus que la fertilisation avec ce type d'engrais est parfois associée avec une plus grande disponibilité de NO_3 (exposition journalière aux nitrates dans le sol de surface) (Zebarth et coll. 2012) et une plus grande minéralisation du N du sol liée à l'activité microbienne profitant d'une libération constante de nitrate en saison (Ziadi et coll. 2011). De plus, d'un point de vue économique, la réduction des passages de machinerie et des doses totales à apporter sont généralement évoquées pour convaincre les producteurs de l'adoption du FRN (Mckeown 2010; Bero et coll. 2014) bien que **le FRN serait 11 % moins cher (coût à l'unité de N) que le CAN** (Perreault 2016 [comm. pers.]).

Si l'on assume que les ELC peuvent permettre d'apporter des doses de fertilisant inférieures en considérant les meilleurs moments pour les appliquer, selon une estimation, il serait possible de réduire jusqu'à 50 % la dose appliquée en comparaison des doses d'ECV et ainsi l'optimisation de la technologie des ELC présenterait un potentiel énorme en conservation de la qualité de l'eau (Shoji et coll. 2001). ***Au Québec, le FRN demeure très peu utilisé*** (Beaudoin; Lepage; Roy; 2016 [comm. pers.])***, mais son adoption serait en hausse ces dernières années*** (Perreault 2016 [comm. pers.]).

12. Minimiser les pertes du N résiduel

Malgré une gestion optimale de la fertilisation et des prélèvements du N par les cultures, l'utilisation à 100 % du N qui se solderait en une absence de NO_3 susceptible de lessiver est irréaliste. En complément, une fois les étapes précédentes réalisées en priorité, il est donc important d'adopter des pratiques culturales et de procéder à des aménagements qui favorisent le recaptage du NO_3 résiduel et minimise la dispersion de la partie non prélevée par la culture principale dans l'environnement.

12.1 Implanter des cultures pièges

La première intention derrière l'utilisation des cultures pièges est de prélever le N résiduel du sol à l'automne (Valkama et coll. 2015). Cette action est particulièrement pertinente en culture de pommes de terre. D'une part, cette culture laisse des quantités importantes de NO_3 résiduel en régie conventionnelle, de l'ordre de 60 - 110 kg NO_3/ha, et même parfois plus en conditions

de croissance défavorables (Lynch et coll. 2012). Ces quantités sont donc bien suffisantes pour soutenir une croissance intéressante des cultures pièges. D'autre part, sous notre climat, la teneur en NO_3 résiduel post-récolte est un des facteurs les plus corrélés avec la quantité de NO_3 lessivé (Bélanger et coll. 2003). L'implantation des cultures pièges tout de suite après la récolte a ainsi été identifiée comme étant une stratégie encore plus efficace que la réduction des apports de N pour diminuer les pertes de NO_3 par lessivage (Hansen et Djurhuus 1996; Constantin et coll. 2010). Cela dit, toutes les solutions présentées aux étapes précédentes, qui peuvent être entreprises avant dans la saison, ont en fait comme but commun, de laisser le moins de NO_3 résiduel suivant la récolte. Elles conservent donc toute leur importance.

Selon certains travaux, les cultures pièges permettraient des réductions de 50 % du lessivage du NO_3, comparativement à des témoins sans culture de couverture (Valkama et coll. 2015) et elles maintiendraient des concentrations de moins de 10 mg NO_3-N/L dans l'eau de drainage (INRA 2012). Évidemment, selon le type de culture, des résultats différents seront obtenus. Au Québec, un essai de 2007-2009 réalisé à Deschambault utilisant l'azote marqué N^{15} dans la pomme de terre a montré que des cultures de couverture d'automne en avoine, moutarde jaune, blé et seigle d'automne pouvaient être utilisées efficacement pour prélever le N résiduel, mais pas les millets (sibérien et japonais) qui n'avaient pas réussi à produire suffisamment de biomasse. Avec les autres cultures, les quantités résiduelles d'azote N^{15} mesurées dans le profil du sol (0-90 cm) ont permis une rétention de 32 % plus d'azote résiduel que la culture de pomme de terre en continu (2 ans) (N'Dayegamiye et coll. 2010a). Il a été observé que des variétés de raygrass peuvent prélever jusqu'à 30-40 kg N résiduel/ha (Alvenäs et Marstorp 1993; Thomsen et Hansen 2014). À l'opposé, l'usage de cultures de légumineuses est questionnable comme culture piège puisqu'elles couvrent leurs besoins par la fixation du N_2 atmosphérique et n'absorbent que peu de N du sol. Leur incorporation au mauvais moment peut même se traduire par une augmentation marquée des concentrations en NO_3 lessivé (Hepperly et coll. 2009). Par ailleurs, une culture de couverture composée de plusieurs espèces permettra d'avoir plus de biomasse et donc de prélèvements en N si le mélange contient des espèces qui n'ont pas la même phénologie et le même comportement d'acquisition du N (ex: système racinaire superficiel ou profond).

Toutefois, certaines problématiques spécifiques à la pomme de terre restent à régler pour s'assurer de l'efficacité des cultures pièges et de la faisabilité de les inclure comme outil de gestion du N. Par exemple, l'implantation de cultures après la récolte ne laisse souvent pas suffisamment de temps à la culture pour s'établir. Il est donc possible de n'avoir aucun effet en comparaison du sol laissé à nu à l'automne (Bundy et Andraski 2005). ***Pour remédier à ce problème, la culture piège pourrait être semée simultanément à la récolte puisque cette dernière s'étale souvent sur un mois, ainsi plusieurs semaines de croissance seraient gagnées*** (Cambouris 2016 [comm. pers.]). ***Le choix d'un cultivar hâtif, récolté plus tôt, donnerait aussi une meilleure fenêtre de croissance à la culture piège*** (Roy 2016 [comm. pers.]). ***Cet aspect sera d'ailleurs exploité dans un projet de 3 ans débuté en 2016 en culture biologique de pommes de terre. Une culture de blé d'automne sera implantée en août en post-récolte d'un***

cultivar hâtif de pomme de terre, pour être récolté l'année suivante. Cette façon de faire la rotation pourrait contribuer à diminuer le lessivage du NO_3 (Landry 2016 [comm. pers.]). Il faut aussi s'assurer que le rapport C/N du mélange enfoui est suffisamment bas (inférieur à 30) pour ne pas causer une immobilisation du N (Finney et coll. 2016) qui mènerait à une baisse de rendement pour la culture suivante (Griffin et Hesterman 1991), comme par exemple le seigle d'automne incorporé au printemps avant une culture de maïs-grain qui a résulté en des rendements variables selon les années (Johnson et coll. 1998; Kuo et Jellum 2000). En général, les graminées et les brassicacées auront un effet immobilisant ou non selon le stade d'incorporation contrairement aux légumineuses qui on effet azoté à court terme toujours positif. Néanmoins, les graminées et les brassicacées présentent un potentiel plus grand de rétention du N résiduel du sol que les légumineuses (Justes 2013). Des conditions non propices au travail de sol au moment d'enfouir la culture de couverture en automne ou au printemps peuvent aussi devenir un frein à leur utilisation, tout comme l'incorporation tardive proche des premières gelées qui accroissent les risques d'érosion du sol (Justes 2012).

Les cultures pièges pourraient aussi être semées en intercalaire dans les entre-rangs de pommes de terre, bien que ce ne soit pas une pratique répandue au Québec. Celle-ci pourrait toutefois être intéressante sous nos conditions plus nordiques qui réduisent la fenêtre de croissance des cultures semées en post-récolte. De surcroît, cela permet de réduire le travail du sol au début de l'automne, une pratique qui stimule la minéralisation du N et accroît les risques de pertes de NO_3 (Aronsson 2000). Par contre, la culture intercalaire a pour désavantage de faire compétition avec la culture principale pour les nutriments, l'eau ou la lumière, ce qui peut se traduire par des pertes de rendement (Breland 1996; Känkänen et coll. 2001 ; 2003). Dans un essai en agriculture biologique en Allemagne, une culture de pommes de terre, cultivée en intercalaire avec du plantain (Plantago lanceolata L.), a toutefois donné des rendements comparables à la pratique conventionnelle, tout en laissant des quantités de N résiduel nettement moins importantes (réduction de 52-56 %) (Rauber et coll. 2008). ***Dans la région de Rivière-du-Loup, des essais de raygrass semé entre les rangs de pommes de terre ont montré un potentiel intéressant, quoique la technique reste à parfaire pour améliorer l'uniformité et la rapidité du semis, à l'aide d'un équipement plus adapté*** (Ouellet 2016 [comm. pers.])***.*** Une croissance plus uniforme du raygrass en résulterait.

12.2 Utiliser des inhibiteurs de nitrification

Les inhibiteurs de nitrification, incorporés aux fertilisants, sont des composés qui retardent l'oxydation du NH_4 en NO_3 par les bactéries Nitrosomonas spp. (Tan et coll. 2013). Le dicyandiamide (DCD) et le 3,4-dimethyl parasol phosphate (DMPP) sont les plus connus. Le DCD appartient toutefois au groupe des composés chlorés (Trenkel 1997; Zerulla et coll. 2001), contrairement au DMPP qui ne présenterait pas d'effet secondaire sur la qualité de l'environnement (Zaman et coll. 2009). Des inhibiteurs biologiques ont aussi fait leur apparition. Ils sont faits de métabolites secondaires (ex. acides phénoliques, terpénoïdes) de plantes qui peuvent pousser dans les sols limités en N (Castaldi et coll. 2009; Suescun et coll. 2012). Suite à

divers tests, les inhibiteurs ne sont toutefois pas recommandés en culture de pomme de terre. Bien qu'ils diminuent la concentration en NO_3 des sols (Yu et coll. 2015), l'absence de bénéfice sur la prévention du lessivage (Sahota et Singh 1984; Vos 1994) ou des baisses de rendement et de qualité des tubercules (Kelling et coll. 2011) ont été observées. Ces résultats étaient dus à l'accroissement des concentrations en ion NH_4 dans le sol qui interfère avec le métabolisme de la pomme de terre. Dans la pratique, le NH_4 des fertilisants est rapidement transformé en NO_3 et on ne dénote pas d'effet négatif sur la croissance du plant, mais lorsqu'il persiste, cela devient néfaste (Kelling et coll. 2011). ***De plus, lorsque l'effet inhibiteur se dissipe, on assiste à une libération ponctuelle de NO_3 qui n'est pas protégé contre le lessivage*** (Perreault 2016 [comm. pers.])**.**

12.3 Revoir certaines pratiques agricoles

Afin de n'exclure aucune option, certaines pratiques agricoles pourraient être révisées pour tenter de limiter les pertes de nitrate vers l'environnement. Par exemple, confectionner une butte plus large et plane sur le dessus pour cultiver la pomme de terre favoriserait les rendements et les prélèvements en N (Kelling et coll. 2015). Le travail de sol a aussi un impact marqué sur le risque de lessivage du N vu son impact sur les propriétés physiques du sol comme la macroporosité et la stabilité des agrégats (Reynolds et coll. 2002; Tan et coll. 2002), le contenu en MO (Angers et coll. 1997; Yang et coll. 2008) ou le nombre de vers de terre (Tan et coll. 2002). Un travail bien effectué au moment le plus propice peut donc permettre de diminuer le lessivage du nitrate. À l'Île-du-Prince-Édouard, l'impact du travail de sol a été étudié sur les pertes de NO_3 associées à une rotation de type orge-fourrage-pomme de terre (orge avec mélange légumineuses/graminées en intercalaire, suivi d'une année avec la repousse du mélange légumineuses/graminées avant le retour en pomme de terre). Spécifiquement, le labour de la culture fourragère au printemps au lieu de l'automne a permis d'abaisser de 20-60 % les pertes de NO_3 associées à cette culture dans la rotation et donc de réduire l'impact global de cette dernière sur la qualité de l'eau (Jiang et coll. 2015).

12.4 Aménager les champs adéquatement

De bonnes pratiques agroenvironnementales comme le nivellement, l'aménagement de bandes riveraines et de haies brise-vent sont déjà proposées à l'intérieur du Guide des bonnes pratiques agroenvironnementales (MAPAQ 2005) et sont adoptées par plusieurs producteurs. Ces aménagements vont limiter le ruissellement et l'érosion des sols qui contaminent ultimement l'eau souterraine et de surface. Ces bonnes pratiques doivent être maintenues et l'adoption de nouvelles pratiques plus récentes doit se faire dans une bonne cohabitation (ex : installation de pivot d'irrigation qui peuvent mener à la destruction de haies brise-vent).

12.5 Tirer profit des modèles de simulation de pertes

Certains modèles de simulation de pertes à l'échelle de la ferme ou du bassin versant (Kraft et Stites 2003) peuvent être utilisés pour tenter de cibler le mieux possible comment intervenir. Mieux comprendre ses pertes c'est aussi mieux les prévenir et les gérer. À l'échelle de la ferme, on retrouve les modèles SOILN (Johnsson et coll. 1987), LEACHM (Jiang et coll. 2011), NLEAP (Shaffer et coll. 1991) et HYDRUS (Simunek et coll. 2008). Le logiciel par exemple, HYDRUS-2D simule les pertes par lessivage liées au transport des solutés (eau et nutriments) dans le sol et ce, en utilisant seulement les paramètres de conductivité hydraulique, de dispersion de l'eau et de la concentration en nitrate (Shekofteh et coll. 2013) qui sont relativement faciles à obtenir. À plus grande échelle, en Belgique, des cartes d'indicateurs de risques immédiats (concentrations en NO_3 de l'eau lessivée à partir de la zone racinaire) et à plus long-terme (temps de transfert du NO_3 à 1,5 m de profondeur et jusqu'à la nappe phréatique et concentrations en NO_3 dans l'eau de recharge) ont été produites en fonction de l'utilisation du territoire et des données climatiques grâce au modèle EPIC combiné à un système d'information géographique (GIS) (Sohier et coll. 2009). Ces outils ont pu montrer la vulnérabilité de certains sites et bassins versants quant aux risques de pertes de NO_3 par lessivage et ont mené à des mobilisations pour créer des aménagements de protection. Ils ont favorisé la concertation entre les producteurs pour trouver des mesures pour limiter les risques de contamination, ce qui est important puisque les contaminants voyagent à l'extérieur des fermes. Dans la même veine, ***il faut également continuer de sensibiliser les producteurs à respecter la distance suggérée pour les épandages près des puits (30 m) qui est actuellement souvent outrepassée*** (Beaudoin 2016 [comm. pers.]). Enfin, en dernier recours, des stratégies d'épuration de l'eau contaminée aux exutoires des zones de production intensive, telle que la reconstruction de réservoirs comme des milieux humides, pourraient également s'avérer efficaces pour corriger un problème de contamination (Baker 2001).

13. Conclusion

De par la nature des sols et de la culture, les superficies en production de pommes de terre sont particulièrement vulnérables aux pertes de N par lessivage. Des signes concrets de contamination des eaux y sont d'ailleurs répertoriés, telle la contamination des puits d'eau potable. Une attention particulière et des mesures concrètes doivent donc être apportées sur la gestion du N sur ces entreprises.

Actuellement, un constat posé pour diverses cultures maraîchères irriguées, qui présentent des défis similaires à ceux rencontrés pour la pomme de terre, suggère que certaines stratégies disponibles actuellement permettent effectivement de réduire de 40 à 80 % les pertes de nitrate par lessivage, sans affecter les rendements. Ce taux de réussite passe principalement par un bon

ajustement de l'irrigation (réduction de 80 % des pertes), de la fertilisation (réductions de 40 % des pertes) et de l'utilisation d'une culture piège de couverture (réductions de 50 % des pertes) (Quemada et coll. 2013). Dans un même ordre d'idées, en France, la Directive nitrate (5e programme) (2014), adoptée pour protéger les eaux contre la pollution d'origine agricole en zones vulnérables, comprend comme actions jugées efficaces et rendues obligatoires: d'enregistrer ses pratiques (1), d'équilibrer strictement la fertilisation avec les besoins culturaux, doublé de l'obligation d'un fractionnement minimum des apports (2), de limiter la pression d'azote de l'élevage (3), d'avoir un stockage adapté des effluents (4), de couvrir ses sols en interculture (5), de respecter les conditions (6) et les périodes d'interdiction (7) d'épandage, et d'implanter une bande enherbée en bordure des cours d'eaux (8).

Si les points liés davantage à la gestion des effluents sont moins centraux dans le cas de la production de pommes de terre, puisque peu de producteurs fertilisent avec des engrais de ferme, ces deux sources d'informations recoupent bel et bien plusieurs actions ciblées dans cette revue de littérature, auxquelles devraient être ajouté comme action prioritaire une optimisation de la fourniture naturelle en N du sol, ce qui englobe la restauration ou le maintien de sa qualité, puisque les sols sous cette production exigeante présentent souvent une qualité déficiente. Le travail de synthèse ici présenté mène en effet à penser que l'aspect de l'amélioration globale de la santé des sols et de la capacité de prédire la fourniture en N des sols dans la production de pommes de terre n'ont pas encore reçu l'attention méritée, bien qu'ils devraient permettre de susciter un changement notable quant aux risques associés à cette culture sur la qualité de l'eau. De plus, une attention particulière devrait être portée sur le rôle que peuvent jouer l'irrigation et les engrais à libération contrôlée qui pourraient faire une grande différence pour peu que les producteurs aient accès à un guide pratique de régie raisonnée des apports en eau et à des recommandations de fertilisation établies avec ces nouveaux produits.

En conclusion, la philosophie globale d'action devrait s'initier par une maximisation et une quantification de la fourniture naturelle en N du sol afin de minimiser la dose d'apport externe. Cette dose se doit ensuite d'être la plus adéquate possible, apportée sous une forme peu lessivable, avec précision, à un temps et selon un mode qui favorise son prélèvement. Et cela, en mettant en place des pratiques complémentaires qui haussent son taux d'utilisation et des aménagements agricoles qui minimisent les pertes de N résiduel. Pour y arriver, un diagnostic spécifique à chaque entreprise des sols et des pratiques devrait donc être complété par le producteur et son conseiller agronomique. Ce diagnostic permettra de dégager et mettre en branle des solutions adaptées à chaque entreprise. La réduction des pertes doit aussi être réalisée de concert, à l'échelle du bassin versant. En effet, puisque le problème de la qualité de l'eau est présent à des échelles variables (culture, ferme et bassin versant), des stratégies de mitigation doivent être appliquées à toutes les échelles du problème, pour enfin rencontrer les cibles. Pour favoriser une action globale, des actions concertées devront davantage être mises sur pied pour soutenir les agriculteurs dans leurs démarches d'amélioration pour le plus grand bien des producteurs et de la collectivité.

14. Références

Agriculture and Forestry Information Centre (AFIC). 2002. Nitrogen sources in potato fertilizers. Prince Edward Island, Canada: Agriculture and Forestry Information Centre. http://www.gov.pe.ca/photos/original/af_fact_potatoN.pdf

Agrium inc. 2016. ESN . http://www.smartnitrogen.com/what-esn/nitrogen-action

Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Lærke, P.E., Plauborg, F., Sepaskhah, A.R., Jensen, C. R. et Hansen, S. 2011. Interaction of different irrigation strategies and soil textures on the nitrogen uptake of field grown potatoes. Int J Plant Prod. 5(3): 263–274.

Allen, E.J. et Scott R.K. 1980. An analysis of the potato crop. J Agric Sci Camb. 94:583-606.

Alva, L. 2004. Potato Nitrogen Management. J Veg Crop Prod. 10(1): 97-130.

Alva, A.K., Paramasivam, S., Fares, A., Delgado, J. A., Mattos, D. et Sajwan, K. 2006. Nitrogen and Irrigation Management Practices to Improve Nitrogen Uptake Efficiency and Minimize Leaching Losses. J. Crop Improvement. 15(2): 369–420.

Alva, A.K., Moore, A.D. et Collins, H.P. 2012. Impact of Deficit Irrigation on Tuber Yield and Quality of Potato Cultivars. Journal of Crop Improvement. 26(2): 211–227.

Alvenäs, G. et Marstorp, H. 1993. Effect of ryegrass catch crop on soil inorganic-N content and simulated nitrate leaching. Swedish J. Agric. Res. 23: 3–14.

Amtmann, A., Hammond, J.P., Armengaud, P.,White, P.J. et Callow, J.A. 2005. Nutrient sensing and signalling in plants: potassium and phosphorus. Adv Bot Res. 43: 209–257.

Angers, D.A., Bolinder, M.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Drury, C.F., Liang, B.C., Voroney, R.P., Simard, R.R., Donald, R.G., Beyaert, R.P. et Martel, J. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen in cool, humid soils of Eastern Canada. Soil Tillage Res. 41:191-201.

Aronsson, H., 2000. Nitrogen Turnover and Leaching in Cropping Systems with Ryegrass Catch Crops. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala Doctoral Dissertation. 32 p.

Asfary, A.F., Wild, A.F. et Harris, M.P. 1982. Growth, mineral nutrition and water use by potato crops. J Agr Sci. 100: 87–101.

Badr, M. A., El-Tohamy, W. A. et Zaghloul, A. M. 2012. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. Agr Water Manage. 110: 9–15.

Baker, J.L. 2001. Limitations of improved nitrogen management to reduce nitrate leaching and increase use efficiency. TheScientificWorld 1(S2): 10–16.

Baldock, J.A., et Nelson, P.N. 2000. Soil organic matter. Dans: Sumner, Malcolm E., (ed.) Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, B25-B84.

Bélanger, G., Walsh, J.R., Richards, J.E., Milburn, P.H. et Ziadi, N. 2000. Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. Agron. J. 92: 902–908.

Bélanger, G., Walsh, J. R., Richards, J. E., Milburn, P. H. and Ziadi, N. 2001a. Predicting nitrogen fertilizer requirements of potatoes in Atlantic Canada with soil nitrate determinations. Can. J. Soil Sci. 81: 535-544.

Bélanger, G., Walsh, J.R., Richards, J.E., Milburn, P.H. et Ziadi, N. 2001b. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. Am J Potato Res. 78: 355–364.

Bélanger, G., Ziadi, N., Walsh, J.R., Richards, J.E. et Milburn, P.H. 2003. Residual soil nitrate after potato harvest. J Environ Qual. 32(2): 607–612.

Benoit, M., Garnier, J., Anglade, J., Billen, G. 2014. Nitrate leaching from organic and conventional arable crop farms in the Seine Basin (France). 100: 285–299.

Bero, N.J., Ruark, M.D. et Lowery, B. 2014. Controlled-Release Fertilizer Effect on Potato and Groundwater Nitrogen in Sandy Soil. Agron J. 106(2): 359-368.

Boivin, C., Landry, C. et Caron, J. 2008. Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte de nitrates. Rapport final remis au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. IRDA. 47 p.

Boivin, C. et C. Landry. 2008. Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport final déposé au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. IRDA. 51 p.

Boivin, C. et Landry, C. 2010. Impact de l'excès d'eau selon le stade phénologique sur le rendement et l'utilisation de l'azote minéral par la pomme de terre. Fiche synthèse, IRDA. 3 p.

Boivin, C. et Landry, C. 2011a. Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre. Rapport final présenté au CDAQ. 71 p.

Boivin, C. et C. Landry, C. 2011b. Impact de l'irrigation sur la dynamique de l'azote du sol, la nutrition, le rendement et la qualité du bleuet en corymbe en implantation. Rapport de recherche, IRDA. 45 p.

Boivin, C. et Landry, C. 2012. Irrigation de la pomme de terre sous une gestion locale et globale en lien avec les rendements et la perte des nitrates. Rapport final présenté au CDAQ. 48 p.

Boivin, C. et Bergeron, D. 2014. Gestion de l'eau et planification des irrigations. CRAAQ – Colloque Fertilisation, agriculture de précision et agrométéorologie. 3p.

Boivin et Bergeron. 2015. Pourquoi pas un service-conseil en irrigation? Présentation au CRAAQ Colloque Pomme de terre. 22 p.

Botha, E.J., Leblon, B., Zebarth, B.J., Watmough, J. 2007. Non-destructive estimation of potato leaf chlorophyll from canopy hyperspectral reflectance using the inverted PROSAIL model. Intern J Appl Earth Observ Geoinform 9:360–374.

Breland, T.A., 1996. Green manuring with clover and ryegrass catch crops undersown in small grains: crop development and yields. Acta Agric. Scand. 46 : 30–40.

Bruin, A.J., Ball Coelho, B.R., Beyaert, R.P., Reeleder, R.D., Roy, R.C. et Capell, B. 2010. High value crops in coarse-textured soil and nitrate leaching How risky is it? Can J Plant Sci. 90 (4) : 515-528.

Bundy, L.G., Wolkowski, R.P. et Weis, G.G. 1986. Nitrogen source evaluation for potato production on irrigated sandy soils. Am Potato J. 63: 385–397.

Bundy, L.G. et Andraski, T.W. 2005. Recovery of Fertilizer Nitrogen in Crop Residues and Cover Crops on an Irrigated Sandy Soil. Soil Sci Soc Am J. 69: 640-648.

Bundy, L.G. et Ostherhaus, J.T. 2006. Regional Experiences With The Illinois Amino Sugar N Test. University of Wisconsin-Madison Department of Soil Science. http://documentslide.com/documents/university-of-wisconsin-madison-department-of-soil-science-2006-regional-experiences.html

Cao, W. et Tibbitts, T. 1993. Study of various NH_{+4} /NO_{-3} mixtures for enhancing growth of potatoes. J Plant Nutr. 16: 1691– 1704.

Cambardella, C.A., Delate, K., Jaynes, D.B. 2015. Water Quality in Organic Systems. Sustain Agric Res. 4(3):60.

Cambouris, A.N., Nolin, M.C., Zebarth, B.J., Laverdiere, M. 2006. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. Am J Potato Res 83:381–395.

Cambouris, A.N., Zebarth, B.J., Nolin, M.C. et Laverdière, M. 2007. Response to added nitrogen of a continuous potato sequence as related to sand thickness over clay. Can J Plant Sci. 87: 829-839.

Cambouris, A.N., Zebarth, B.J., Ziadi, N. et Perron, I. 2014. Precision Agriculture in Potato Production. Potato Res. 57: 249–262.

Cambouris, A.N., St. Luce, M., Zebarth, B.J., Ziadi, N., Grant, C.A. et Perron, I. 2015. Potato Response to Nitrogen Sources and Rates in an Irrigated Sandy Soil. Agron J. 108: 391–401.

Castaldi, S.,Carfora, A., Fiorentino, A., Natale, A., Messere, A., Miglietta, F. et Cotrufo, M.F. 2009. Inhibition of net nitrification activity in a Mediterranean woodland: Possible role of chemicals produced by Arbutus unedo. Plant Soil. 315: 273–283.

Cerovic, Z.G., Ounis, A., Cartelat, A., Latouche, G., Goulas, Y., Meyer, S., Moya, I. 2002. The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the non-destructive in situ assessment of UV-absorbing compounds in leaves. Plant Cell Environ 25:1663–1676.

Cohan, J-P. 2011. Fertilisation azotée de la pomme de terre - La dose d'azote apportée conditionne la qualité des tubercules. Arvalis -Institut du végétal 2011. France. En ligne : http://www.arvalis-infos.fr/f-@/view-8570-arvarticle.html.

Cohan, J-P. 2014. Pommes de terre - Engrais : bien choisir la forme à apporter. Arvalis -Institut du végétal 2014. France. En ligne : http://www.arvalis-infos.fr/engrais-bien-choisir-la-forme-a-apporter-@/view-16428-arvarticle.html.

Constantin, J., Mary, B., Laurent, F.,Aubrion, G., Fontaine, A.,Kerveillant, P. et Beaudoin, N. 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. Agric. Ecosyst. Environ 135 : 268–278.

Cooley, E.T., Lowery, B., Kelling, K.A. et Wilner, S. 2010. Water dynamics in drip and overhead sprinkler irrigated potato. Hydrol Process. 21(17): 2390-2399.

CRAAQ. 2010. Guide de références en fertilisation du Québec. 2ième Édition. Ste-Foy, Québec : CRAAQ . 293 p.

Daccache, A., Knox, J.W., Weatherhead, E.K., Daneshkhah, A. et Hess, T.M. 2015. Implementing precision irrigation in a humid climate - Recent experiences and on-going challenges. Agr Water Manage. 147: 135–143

Dalla Costa, L., Delle Vedove, G., Gianquinto, G., Giovanardi, R. et Peressotti, A. 1997. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress. Potato Res. 40: 19-34.

Darwish, T., Atallah, T., Hajhasan, S. et Chranek, A. 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. Nutr Cycl Agroecosys. 67(1): 1–11.

Delgado, J.A., Riggenbach, R.R., Sparks, R.T., Dillon, S.M., Kawandbe, L.M. et Ristau, R.J. 2001. Evaluation of nitrate-nitrogen transport in a potato–barley rotation. Soil Sci Soc Am J. 65: 878–883.

De Jong, R., Yang, J.Y., Drury, C.F., Huffman, E.C., Kirkwood, V. et Yang, X.M. 2007. The indicator of risk of water contamination by nitrate-nitrogen. Can J Soil Sci. 87: 179–88.

Directive Nitrate – 5e programme. 2014. Directive 91/676/CEE du Conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir des sources agricoles. Arrêté régional du 14 mai 2014. Rhône. France. 2 p.

Dry, P. R., Loveys, B. R. et Düring, H. 2000. Partial drying of the rootzone of grape. II. Changes in the pattern of root development. Vitis. 39(1): 9–12.

Duchenne, T., Machet, J.M. et Martin, M. 1997. Potatoes. Dans: Lemaire, G. (ed) Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin. p. 119–130.

Dunn, S.M., Darling, W.G., Birkel, C. et Bacon, J.R. 2012. The role of groundwater characteristics in catchment recovery from nitrate pollution. Hydrol Res. 43(5): 560.

Eerd Van L.L., Congreves, KA, Hayes A, Verhallen A, Hooker DC. 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality , organic carbon , and total nitrogen. Can J Soil Sci. 94: 303–15.

Errebhi, M., Rosen, C.J., Gupta, S.C., et Birong, D.E. 1998. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. Agron J. 90: 10–15.

Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. et Winiwarter, W. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. Nat Geosci. 1: 636–9.

Finney, D.M., White, C.M. et Kaye, J.P. 2016. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. Agron J. 108(1): 39–52.

Follett, R.F. et Hatfield, J.L. 2001. Nitrogen in the environment: sources, problems, and management. Dans: Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. The Scientific World. 1(S2): 920–926.

Fortin, J.G., Anctil, F., Parent, L-É. et Bolinder, M.A. 2010. A neural network experiment on the site-specific simulation of potato tuber growth in eastern Canada. Comput. Electron. Agric. 73:126–132.

Fortin, J.G., Morais, A., Anctil, F., Parent, L.E. 2015. SVMLEACH – NK POTATO: A simple software tool to simulate nitrate and potassium co-leaching under potato crop. Comput Electron Agric. 110:259–66.

Fowler, D., Pyle, J.A., Raven, J.A. et Sutton, M.A. 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. Phil Trans R Soc B. 368(1621).

Fujinuma, R., Balster, N.J., et Norman, J.M. 2009. An improved model of nitrogen release for surface-applied controlled-release fertilizer. Soil Sci Soc Am J. 73(6): 2043–2050.

Germont, J.C et Couton, Y. 1999. La dénitrification dans les sols régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. Courrier de l'environnement. INRA. 38 : 67-74.

Gianquinto, G., Goffart, J.P., Olivier, M., Guarda, G., Colauzzi, M., Dalla Costa, L., Delle Vedove, G., Vos, J., Mackerron, D.K.L. 2004. The use of hand-held chlorophyll meters as a tool to assess the nitrogen status and to guide nitrogen fertilization of potato crop. Potato Res 47:35–80.

Giller, K.E., Chalk, P., Dobermann, A., Hammond, L., Heffer, P., Ladha, J.K., Nyamudeza, P., Maene, L., Ssali, H. et Freney, J. 2004. Emerging technologies to increase the efficiency of use of fertilizer nitrogen. Dans Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment. Vol. 65. Island Press, Washington, DC.

Giroux, I. et Sarrasin, B. 2011. Pesticides et nitrates dans l'eau souterraine près de cultures de pommes de terre - Échantillonnage dans quelques régions du Québec en 2008 et 2009. MDDEP. 31 p.

Goffart, J.P., Olivier, M. et Frankinet, M. 2008. Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: Past-present-future. Potato Res. 51(3-4): 355–83.

Griffin, T.S. et Hesterman, O.B. 1991. Potato response to legume and fertilizer nitrogen sources. Agron. J. 83:1004–1012.

Griffiths, B.S., Ball, B.C., Daniell, T.J., Hallett, P.D., Neilson, R., Wheatley, R.E, Osler, G. et Bohanec, M. 2010. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. Appl Soil Ecol 46:43–53.

Guertal, E.A. 2009. Slow-release nitrogen fertilizers in vegetable production: A review. Horttechnology. 19(1):16–9.

Gupta, A.J., Chattoo, M.A. et Singh, L.A.L. 2007. Drip Irrigation and Fertigation Technology for Improved Yield , Quality , Water and Fertilizer Use Efficiency in Hybrid Tomato. J Agrisearch. 2(2): 94–99.

Haney, R.L., Brinton, W.H. et Evans E. 2008. Estimating Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration, Comm. In Soils Sci. and Plant Anal. 39: 2706-2720.

Hansen, E.M., Djurhuus, J. et Kristensen, K. 2000. Nitrate leaching as affected by introduction or discontinuation of cover crop use. J. Environ. Qual. 29 : 1110–1116.

Hartz, T.K. et Hochmuth, G.J. 1996. Fertility management of drip-irrigated vegetables. HortTechnology. 6(3): 168–172.

Havlin, J.L., S.L. Tisdale, J.D. Beaton, and W.L. Nelson. 2005. Soil Fertility and Fertilizers. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Hazen, S.P., Wu, Y., Kreps, J.A. 2003. Gene expression profiling of plant responses to abiotic stress. Funct Integr Genomics. 3:105–111.

Hénault C., Germon J.C, 1995. Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote (N2O) par les sols. Agronomie, 15, 321-355.

Henry, J. L. et Hogg, T.J. 2003. Evaluation of the effects of irrigation on soil chemical properties. Irrigation sustainability -Saskatchewan activity, Canada. Saskatchewan Irrigation Diversification Center, Canada.

Hepperly, P., Lotter, D., Ulsh, C.Z., Seidel, R. et Reider C. 2009 Compost, Manure and Synthetic Fertilizer Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content. Compost Sci Util. 17(2): 17–126.

Hirel, B., Tétu, T., Lea, P.J., Dubois, F. 2011. Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. 3: 1452–1485.

Honisch, M., Hellmeier, C. et Weiss, K. 2002. Response of surface and sub-surface water quality to land use changes. Geoderma. 105: 277–298.

Hopkins, B.G., Rosen, C. J., Shiffler, A.K., et Taysom, T.W. 2008. Enhanced efficiency fertilizers for improved nutrient management: Potato (Solanum tuberosum). Online Plant Management Network. doi:10.1094/CM-2008-0317-01-RV.

Howden, N.J.K., Burt, T.P., Worrall, F., Mathias, S. et Whelan, M.J. 2011. Nitrate pollution in intensively farmed regions: What are the prospects for sustaining high-quality groundwater? Water Resour Res. 47(11): 1–13.

Huber. A. 2016. Évaluations de la santé des sols à l'aide de différentes méthodes. Journée des producteurs en pépinière de l'IQDHO. 8 p.

Hutchinson, C.M. 2005. Influence of a Controlled Release Nitrogen Fertilizer Program on Potato (*Solanum Tuberosum* L.) Tuber Yield and Quality. Acta Hort. (ISHS). 684: 99–102.

Hyatt, C.R., Venterea, R.T., Rosen, C.J., McNearney, M., Wilson, M.L. et Dolan, M.S. 2010. Polymer-Coated Urea Maintains Potato Yields and Reduces Nitrous Oxide Emissions in a Minnesota Loamy Sand. Soil Sci Soc Am J. 74(2): 419–428.

Internation Plant Nutrition Institute. 2015. Nitrification. Nitrogen Notes 4. En ligne: http://www.ipni.net/publication/nitrogen-en.nsf/0/7F7F448C4D064A5985257C13004C83A3/$FILE/NitrogenNotes-EN-04.pdf

Institut de la Statistique du Québec. 2016. http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/pommes-terre/pt01_2015.htm

Jeanne, T. et Hogue, R. 2016. Comment évaluer les effets des régies de cultures sur la diversité microbienne des sols à l'aide des nouvelles technologies de séquençage en agriculture. IRDA. 3 p.

Jiang, Y.F., Zebarth, B. et Love, J. 2011. Long-term simulations of nitrate leaching from potato production systems in Prince Edward Island, Canada. Nutr Cycl Agroecosys. 91: 307–325.

Jiang, Y., B.J. Zebarth, G.H. Somers, J.A. MacLeod, M.M. Savard. 2012. Nitrate leaching from potato production in Eastern Canada. In Sustainable Potato Production: Global Case Studies, ed. Z. He, R.P. Larkin, and C.W. Honeycutt, 233–250. New York: Springer.

Jiang, Y., Jamieson, T., Nyiraneza, J., Somers, G., Thompson, B. et Murray, B. 2015. Effects of fall vs. spring plowing forages on nitrate leaching losses to groundwater. Groundwater Monitoring and Remediation. 35 (1): 43–54.

Johnsson, H., Bergstorm, L. et Jansson, P. 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. Agric Ecosyst Environ. 18:333–356.

Johnson, T.J., Kasper, T.C., Kohler, K.A., Corak, S.J. et Logsdon, S.D. 1998. Oat and rye overseeded into soybean as fall cover crops in the Upper Midwest. J. Soil Water Conserv. 53:276–279.

Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P., Charles, R., Constantin, J., Dürr, C., Hermon, C., Joannon, A., Le Bas, C., Mary, B., Mignolet, C., Montfort, F., Ruiz, L., Sarthou, J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O. 2012. The use of cover crops in the reduction of nitrate leaching: Impact on the water and nitrogen balance and other ecosystem services. Summary of the study report, INRA (France). 60 p.

Justes, E. 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Eds Quae. Versaille. 105 p.

Känkänen, H., Eriksson, C., Räkköläinen, M. et Vuorinrn, M., 2001. Effect of annually repeated undersowing on cereal grain yields. Agric. Food Sci. Finland 10 : 197–208.

Känkänen, H., Eriksson, C., Räkköläinen, M. et Vuorinen, M. 2003. Soil nitrate N as influenced by annually undersown cover crops in spring cereals. Agric. Food Sci. Finland. 12 : 165-176.

Keeney, D.R. 1983. Transformation and transport of nitrogen. p. 48-64 dans F.W. Schaller et G.W. Bailey (éds.) Agricultural Management and Water Quality. Iowa State University Press, Ames.

Kelling, K.A., Wolkowski, R.P. et Ruark, M.D. 2011. Potato Response to Nitrogen Form and Nitrification Inhibitors. Am J Potato Res. 88(6): 459–469.

Kelling, K.A., Arriaga, F.J., Lowery, B., Jordan, M.O. et Speth, P.E. 2015. Use of Hill Shape with Various Nitrogen Timing Splits to Improve Fertilizer Use Efficiency. Am J Potato Res. 92(1): 71–78.

Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Hoeft, R.G. 2001. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. Soil Sci Soc Am J 65:1751–1760.

Kang, S. et Zhang, J. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. J Ext Bot. 55(407): 2437–2446.

King, B.A. et Stark, J.C. 1997. Potato Irrigation Management. University of Idaho Cooperative Extension System. 16 p.

Kross, B.C., Hallberg, G.R., Bruner, R., Cherryholmes, K. et Johnson, K.J. 1993. The Nitrate Contamination of Private Well Water in Iowa. Am J Public Health. 83: 270-272.

Michele Konschuh, M. Ross H. McKenzie, R.H. et Zvomuya, F. Application of polymer-coated urea (ESN) in potato production in southern Alberta. Rapport de recherche projet #2007F065R; ACAAF Project AB0279. 27 p.

Kuo, S., et Jellum, E.J. 2000. Long-term winter cover cropping effects on corn (Zea mays L.) production and soil nitrogen availability. Biol. Fertil. Soils 31:470–477.

Kuzyakov, Y. et Xu, X. 2013. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. New Phytologist. 198(3) : 656-669.

Landry, C. et Boivin, C. 2013. Engrais à libération contrôlée : potentiel d'utilisation dans la pomme de terre irriguée. Rapport final présenté au MAPAQ - Programme de soutien à l'innovation horticole. 57 p.

Landry, C. et Boivin, C. 2014a. Relations entre les nutritions minérale et hydrique : impacts sur la productivité de la pomme de terre et l'utilisation des engrais azotés. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. 53 p.

Landry, C. et Boivin, C. 2014b. Développement de nouvelles stratégies de fertilisation de la fraise à jour neutre. Rapport final remis au CDAQ. IRDA. 47 p.

Landry, C. 2015. Impact de l'irrigation sur l'efficacité des engrais azotés. Présentation aux Journées Horticoles et Grandes Cultures de Saint-Rémi 2015.

Landry, C. et Boivin, C. 2016. Évaluation du potentiel de la fertigation pour améliorer l'efficacité de l'utilisation du N dans la pomme de terre irriguée de façon raisonnée. Rapport de recherche remis au MAPAQ – Cultivons l'Avenir 2 (Projet IA214178) – (Rédaction en cours).

Lang, N.S., Stevens, R.G., Thornton, R.E., Pan, W.I. et Victory, S. 1981. Nutrient Management Guide: Central Washington Irrigated Potatoes. Cooperative extension Washington State University. 18 p.

Leblanc, M. 2009. Étude agropédologique de la ferme expérimentale de Saint-Bruno. Mémoire de Maîtrise. Université Laval. 125 p.

Lemaire, G. et Nicolardot, B., Eds., 1996. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Les colloques. Reims, France. 320 p.

LeMonte, J.L., Taysom, T.W., Hopkins, B.G., Jolley, V.D. et Webb, B.L. 2009. Residual soil nitrate and potato yield with polymer coated urea. Western Nutr. Manage. Conf., 8: 77-81.

Les Producteurs de pommes de Terre du Québec (PPTQ). 2015.
http://www.pptq.ca/bienvenue.htm

Li, X.Q., Sveshnikov, D., Zebarth, B.J., Tai, H., de Koeyer, D., Millard, P., et coll. 2010. Detection of nitrogen sufficiency in potato plants using gene expression markers. Am J Potato Res. 87(1):50–59.

Liao, X., Su, Z., Liu, G., Zotarelli, L., Cui, Y. et Snodgrass, C. 2016. Impact of soil moisture and temperature on potato production using seepage and center pivot irrigation. Agr Water Manage. 165: 230–236.

Lindinger, H. et Scheidleder, A. 2004. WEU-1: Nitrate in groundwater: Indicator Fact Sheet. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/nitrate-in-groundwater/nitrate-in-groundwater

Liu, C., Rubæk, G.H., Liu, F. et Andersen, M.N. 2015. Effect of partial root zone drying and deficit irrigation on nitrogen and phosphorus uptake in potato. Agr Water Manage. 159: 66–76.

Lu, M., Zhou, X., Yang, Q., Li, H., Luo, Y., Fang, C., Chan, J., Yang, X. et Li, B. 2013. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: A meta-analysis. Ecology. 94(3): 726–38.

Luo, S., Tai, H., Zebarth, B.J., Li, X-Q., Millard, P., De Koeyer, D., Xiong, X. 2011. Sample collection protocol effects on quantification of gene expression in potato leaf tissue. Plant Molec Biol Reporter 29:369–378.

Lynch, D.H, Zheng, Z., Zebarth, B.J., Martin, R.C. 2008. Organic amendment effects on tuber yield, plant N uptake and soil mineral N under organic potato production. Renew Agr Food Syst 23:250–259.

Lynch, D.H., Shari, M., Hammermeister A. et Burton D. 2012. Nitrogen management in organic potatoe production (Chapitre 12). Dans: Z. He et al. (eds.), Sustainable Potato Production: Global Case Studies. 209-230.

Maidl, F.X., Brunner, H. et Sticksel, E. 2002. Potato uptake and recovery of nitrogen 15N-enriched ammonium nitrate. Geoderma. 105(3-4): 167–177.

MAPAQ. 2005. Bonnes Pratiques Agroenvironnementales – Pour votre entreprise agricole. 2ième Édition. Bibliothèque nationale du Québec. Publication no.04-0133.

MAPAQ. 2014. Monographie de l'industrie de la pomme de terre au Québec. 80 p.

MacLeod, J.A., Sanderson, J.B., Campbell, A.J. et Somers. G.H. 2002. Potato production in relation to concentrations of nitrate in groundwater: Current trends in PEI and potential management changes to minimize risk. In Proceedings of a National Conference on Agricultural Nutrients and Their Impact on Rural Water Quality, 15–21. Waterloo, ON, Canada.

Malley, D.F., Yesmin, L., Eilers, R.G. 2002. Rapid analysis of hog manure and manure-amended soils using near-infrared spectroscopy. Soil Sci Soc Am J 66:1677–1686.

Maurot-Gaudry, J-F. 1997. Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologique, biochimique et moléculaire. (eds) Quae. 422 p.

McKeown, A. 2007. Evaluation of controlled release fertilizers for environmentally sustainable vegetable crop production. En ligne : http://www.omafra.gov.on.ca/english/research/new_directions/projects/2007/sr9188.htm.

Meyer, R.D. et Marcum, D.B. 1998. Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen. Agron J. 90: 420–429.

Michaud, A., Deslandes, J., Gilles Gagné, G., Lucie Grenon, L. et Vézina, K. 2009. Gestion raisonnée et intégrée des sols et de l'eau. Rapports de recherche CDAQ. 87 p.

Milburn, P., Richards, J.E., Gartley, C., Pollock, T., O'Neill, H. et Bailey, H. 1990. Nitrate leaching from systematically tiled potato fields in New Brunswick, Canada. J Environ Qual. 19: 448–454.

Milburn, P. 1996. Leaching of nitrates from Atlantic cropping systems/Update on groundwater quality in the NB Potato belt. In Agriculture and Groundwater Quality Workshop. Agricultural Advisory Committee on the Environment, Grand Falls, NB.

Milburn, P., MacLeod, J.A. et Sanderson, B. 1997. Control of fall nitrate leaching from early harvested potatoes on Prince Edward Island. Can Agric Eng. 39: 263-271.

Miller, J.S. et Rosen, C.J. 2005. Interactive effects of fungicide programs and nitrogen management on potato yield and quality. Am J Potato Res. 82: 399-409.

Minotti, P. L., Halseth, D. E. et Sieczka, J. B. 1994. Field chlorophyll measurements to assess the nitrogen status of potato varieties. HortScience 29: 1497-1500.

Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J. van Es, H.M., Thies, J.E., Shayler, H.A., McBride, M.B., Wolfe, D.W. et Abawi, G.S. 2016. Comprehensive assessment of soil healt, third edition, Cornell University.134 p.

Morier, T., Cambouris, A.N., Chokmani, K. 2015. In-Season Nitrogen Status Assessment and Yield Estimation Using Hyperspectral Vegetation Indices in a Potato Crop. Agron J 107(4):1295–309.

Morissette, R., Jégo, G., Bélanger, G., Cambouris, A.N., Nyiraneza, J., Zebarth, B.J. 2016. Simulating Potato Growth and Nitrogen Uptake in Eastern Canada with the STICS Model. Agron. J. 108 (5): 1853–68.

Morot-Gaudry, J.F. 1997. Assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologique, biochimique et moléculaire. INRA. France. 422 p.

Munoz, F., Mylavarapu, R.S. et Hutchinson, C.M. 2005. Environmentally Responsible Potato Production Systems: A Review. J Plant Nutr. 28: 1287–1309.

Myers, R.J.K., Palm, C.A., Cuevas, E., Gunatilleke, I.U.N., Brossard, M. 1994. The synchronization of nutrient demand. Dans: Woomer, P.L, Swift, M.J. (eds) The biological management of tropical soil fertility. John Wiley, Chichester.

Nadon, S., D. Bergeron, C. Boivin, J. Vallée. 2016. Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte en champ. Rapport de recherche présenté au RLIO. IRDA . 59 p.

N'Dayegamiye, A., J. Nyiraneza, J., Laverdière, M., Roy, G. et Gilbert, G. 2010a. Bénéfices des engrais verts d'été et d'automne pour la production de pomme de terre. Rapport final, IRDA et MAPAQ. 34 p.

N'Dayegamiye, A., Gasser, M.-O, Grenier, M., Giroux, M., Landry, C., Guertin, S.P. et Tremblay, G. 2010b. Choix d'indicateurs efficaces pour prédire la fertilité azotée des sols. Rapport final, IRDA et CDAQ. 28 p.

Nduwamungu, C., Ziadi, N., Tremblay, G.F., Parent, L.E. 2009a. Near-infrared reflectance spectroscopy prediction of soil properties: effects of sample cups and preparation. Soil Sci Soc Am J 73:1896–1903.

Nduwamungu, C., Ziadi, N., Parent, L.E., Tremblay, G.F et Thuriès, L. 2009b Opportunities for, and limitations of, near infrared reflectance spectroscopy applications in soil analysis: a review. Can J Soil Sci 89:531–541.

Nelson K.L, Lynch D.H, Boiteau G. 2009. Assessment of changes in soil health throughout organic potato rotation sequences. Agric Ecosyst Environ 131:220–228

NICE. 2009. The guidelines manual 2009.
http://www.nice.org.uk/aboutnice/howwework/developingniceclinicalguidelines/clinicalguidelinedevelopmentmethods/GuidelinesManual2009.jsp

Nyiraneza, J. et Snapp, S. 2007. Integrated Management of Inorganic and Organic Nitrogen and Efficiency in Potato Systems. Soil Sci Soc Am J. 71:1508–1515.

O'Halloran, I. P., von Bertoldi, A. P. et Peterson, S. 2004. Spatial variability of barley (Hordeum vulgare) and corn (Zea mays L.) yields, yield response to fertilizer N and soil N test levels. Can. J. Plant Sci. 84: 307-316.

Olfs, H.-W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A. et Lammel, J. 2005. Soil and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168:414-431.

Olivier, M., Goffart, J.P., Ledent, J.F. 2006. Threshold values for chlorophyll meter as decision tool for nitrogen management of potato. Agron J. 98:496–506.

Parent, L.E., Samson, N. et Fortin, J. 2008. Nouveau concept de gestion de l'azote. CRAAQ-Colloque sur la pomme de terre 2008. 8 p.

Patel, D.K., Patel, P.T., Patel, B.M., Patel, D.M. et Patel, B. J. 2011. Effect of irrigation methods and split application of nitrogen and potash on potato processing tuber yield and net return under North Gujarat conditions. Agr Sci Digest. 31(2): 111–115.

Pavlista, A.D. 2015. Scheduling Reduced Irrigation on "Atlantic" Potato for Minimal Effect. Am J Potato Res. 92(6): 673–683.

Peralta, J.M. et Stockle, C.O. 2002. Dynamics of nitrate leaching under irrigated potato rotation in Washington State: Along-term simulation study. Agr Ecosys Environ. 88: 23–34.

Porter, G.A. et Sisson, J.A. 1991. Petiole nitrate content of Maine grown Russet Burbank and Shepody potatoes in response to varying nitrogen rate. Am Potato J. 68: 493–505.

Porter, G.A. et Sisson, J.A. 1993. Yield, market quality, and petiole nitrate concentration of non-irrigated Russet Burbank and Shepody potatoes in response to sidedressed nitrogen. Am Potato J. 70: 101-116.

Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de Lange, M.N.J., Vallejo, A. et Cooper, J.M. 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. Agric Ecosyst Environ. 1741–1810.

Rauber, R., Liebenau, S., Friedrichs, E., Schmidtke, K. et Kartoffeln, S. 2008. Agronomic Effects of Underseeding Ribwort Plantain (Plantago lanceolata L .) in Organically Grown Potatoes. 12 (1): 32–40.

Raymundo, R., Asseng, S., Cammarano, D. et Quiroz, R. 2014. Potato, sweet potato, and yam models for climate change: A review. Field Crops Res. 166:173–185.

Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S. et Lu, X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma. 110:131-146.

Roosta, H. R., Shahnazari, A. et Nazari, F. 2009. Comparative Effects of Conventional Irrigation (CI) and Partial Root Zone Drying (PRD), and Various Sources of Nitrogen on Growth and Yield in Potato under Field. Am-Eurasian J Sustain Agr. 3(4): 643–651.

Roth, G.W. et Fox, R.H. 1990. Soil nitrate accumulation following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania. J Environ Qual. 19: 243-248.

Sahota, T.S. et Singh, M. 1984. Relative efficiency of N fertilizers as influenced by N-Serve in the potato crop. Plant Soil. 79: 143–152.

Samson, N., Parent, L.E., Foko, A., Parent, P. et Morissette, S. 2006. Utilisation du chlorophylle-mètre (SPAD) comme outil diagnostic à la fertilisation azotée de la pomme de terre. Affiche : 20ième édition de la journée champêtre de la pomme de terre, 11 août 2006 : Culture H. Dolbec inc.

Samson, N., Parent, L-É., Nyiraneza, J. et Ziadi, N. 2011. Efficacité du FRN dans la fertilisation de la pomme de terre. Présentation au CRAAQ –Colloque pomme de terre 2001. 10 p.

Sanchez, J.E., Willson, T.C., Kizilkaya, K., Parker, E. et Harwood, R.R. 2001. Enhancing the Mineralizable Nitrogen Pool Through Substrate Diversity in Long Term Cropping Systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:1442-1447.

Sanderson, J.B. et White, R.P. 1987. Comparison of urea and ammonium nitrate as nitrogen sources for potatoes. Am Potato J. 64: 165–176.

Sattelmacher, B., Klotz, F. et Marschner, H. 1990. Influence of the nitrogen level on root morphology of two potato varieties differing in nitrogen aquisition. Plant Soil. 123: 131–137.

Schachtman, D.P. et R. Shin, R. 2007. Nutrient sensing and signaling: NPKS. Annual Rev Plant Biol. 58: 47–69.

Scheffer, B. 1976. Nitrogen transformation in fen soils (en allemand). Landwirtschaftliche Forschung. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt-am-main, Germany. 33: 20-28.

Schnable, P.S., Hochholdinger, F., Nakazono, M. 2004. Global expression profiling applied to plant development. Curr Opin Plant Biol , 7: 50–56.

Schmid, M., Davison, T.S, Henz, S.R., Pape, U.J., Demar, M., Vingron, M., Schölkopf, B., Weigel, D., Lohmann, J.U. 2005. Nat Genet. 2005 A gene expression map of Arabidopsis thaliana development. Nat Genet. 37(5):501-6.

Serna, M.D. et Pomares, F. 1992. Nitrogen mineralization of sludge-amended soil. Bioresource Tech. 39: 285-290.

Shahnazari, A., Ahmadi, S.H., Laerke, P.E., Liu, F., Plauborg, F., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. et Andersen, M.N. 2008. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes. Europ J Agronomy. 28: 65–73.

Shaffer, M.J., Halvorson, A.D. et Pierce, F.J. 1991. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): model description and application. Dans: Follett, R.F., Keeney, D.R. et Cruse, R.M. (eds) Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. Soil Science Society of America, Madison, 285 p.

Sharifi, M., Zebarth, B. J., Burton, D. L., Grant, C. A., Porter, G. A., Cooper, J. M., Leclerc, Y., Moreau, G. et Arsenault, W. J. 2007. Evaluation of laboratory-based indices of nitrogen availability as predictors of field-based estimates of soil nitrogen supply in potato production. Plant Soil 301: 203-214.

Shekofteh, H., Afyuni, M., Hajabbasi, M.A., Iversen, B.V., Nezamabadi-Pour, H., Abassi, F., et Sheikholeslam, F. et Shirani, H. 2013. Modeling of Nitrate Leaching from a Potato Field using HYDRUS-2D. Commun Soil Sci Plant Anal. 44: 2917–2931.

Shillito R.M, Timlin D.J, Fleisher D., Reddy V.R, Quebedeaux B. 2009. Yield response of potato to spatially patterned nitrogen application. Agric Ecosyst Environ 129:107–116.

Shock, C., Flock, R., Eldredge, E., Pereira, A. et Jensen, L. 2006. Successful Potato Irrigation Scheduling. Sustainable Agriculture Techniques. 8 p.

Shock, C.C. et Shock, C.B. 2012. Research, Extension, and Good Farming Practices Improve Water Quality and Productivity. J Integr Agric. 11(1): 14–30.

Shoji, S., Delgado, J., Mosier, A. et Miura, Y. 2001. Use of Controlled Release Fertilizers and Nitrification Inhibitors To Increase Nitrogen Use Efficiency and To Conserve Air and Water

Quality Use Efficiency and To Conserve Air and Water Quality. Commun Soil Sci Plant Anal. 32(7-8): 1051–1070.

Shock, C.C., Pereira, A.B. et Eldredge, E.P. 2007. Irrigation Best Management Practices for Potato. Am J Potato Res. 84: 29–37.

Shrestha, R., Cooperband, L. et MacGuidwin, A. 2010. Strategies to reduce nitrate leaching into groundwater in potato grown in sandy soils: Case study from North Central USA. Am J Potato Res. 87: 229–244.

Simard, R.R. et N'dayegamiye, A. 1993. Nitrogen-mineralization potential of meadow soils. Can. J. Soil. Sci. 73 (1): 27-38.

Simonne, E.H. et Hutchinson, C.M. 2005. Controlled-release fertilizers for vegetable production in the era of best management practices: Teaching new tricks to an old dog. HortTechnology. 15: 36–46.

Simunek, J., van Genuchten, M.T. et Miroslav, S. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone J 7:587–600.

Skopp, J., Jawson, M.D. et Doran. J.W. 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1619 – 1625.

Stark, J.C., McCann, I.R., Westermann, D.T., Izadi, B. et Tindall, T.A. 1993. Potato response to split nitrogen timing with varying amounts of excessive irrigation. Am Potato J. 70: 765–777.

Stark, J.C. et Porter, G.A. 2005. Potato nutrient management in sustainable cropping systems. Am. J. Pot. Res. 82:329-338.

Starr, G.C., Cooley, E.T., Lowery, B. et Kelling, K. 2005. Soil water fluctuations in a loamy sand under irrigated potato. Soil Sci. 170(1976): 77–89.

Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil. Wiley, New York.

Subhash, C., Ashif,M., Zargar, M.Y. et Ayub, B.M. 2011. Nitrate Pollution: A Menace to Human, Soil, Water and Plant. Univers J Environ Res Technol. 1(1): 22–32.

Suescun, F., Paulino, L., Zagal, E., Ovalle, C. et Muñoz, C. 2012. Plant extracts from the Mediterranean zone of Chile potentially affect soil microbial activity related to N transformations: A laboratory experiment. Acta Agric Scand Sect B Soil Plant Sci. 62: 556–564.

Sutton M., Billen G., Bleeker A., Erisman J. W., Grennfelt P., Van Grinsven H., Grizzetti B., Howard C. et Leip A. 2011. European Nitrogen Assessment - Technical Summary. Dans : European Nitrogen Assessment (Chapter 24). Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. xxxv-lii.

Swindell, W.R. 2006. The association among gene expression responses to nine abiotic stress treatments in Arabidopsis thaliana. Genetics 174: 1811–1824.

Tan, C.S., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Gaynor, J.D., Zhang, T.Q. et Ng, H.Y. 2002. Effect of long-term conventional tillage and no-tillage systems on soil and water quality at the field scale. Water Sci Technol. 46: 183-190.

Tan, H., Xu, M., Li, X., Zhang, H. et Zhang, C. 2013. Effects of chlorimuronethyl application with or without urea fertilization on soil ammonia-oxidizing bacteria and archaea. J HazardMater. 260: 368–374.

Thomsen, I.K. et Hansen, E.M. 2014. Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre and postharvest sowing and time of incorporation. Soil Use Manage. 30: 48-57.

Tisdale, S.L., W.L. Nelson, and J.D. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizers. MacMillan Publishing Co., New York.

Trenkel, M.E. 1997. Improving fertilizer use efficiency: Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. Int. Fert. Ind. Assoc., Paris, France. 151 p.

Tremblay, N., Grenon, L., Fallon, E., Bélec, C., Surprenant, J. et Lafrenière-Landry, M. 2014. "SCAN 2014 : Rencontre des collaborateurs.", Saint-Jean-sur-Richelieu, Canada, 11 décembre 2014. (Presentation)

Tremblay et Seydoux. 2016. Viser la dose optimale d'azote – pour concilier profits et environnement. CRAAQ. Publication PSOL0106-PDF. 19 p.

Ünlü, M., Kanber, R., Senyigit, U., Onaran, H. et Diker, K. 2006. Trickle and sprinkler irrigation of potato (Solanum tuberosum L.) in the Middle Anatolian Region in Turkey. Agr Water Manage. 79(1): 43–71.

Valkama, E., Lemola, R., Känkänen, H. et Turtola, E. 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. Agric Ecosyst Environ. 203:93–101.

Vallée, J., Boivin, C., Bergeron, D., Chrétien, F. et René, E.T. 2013. Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Fiche synthèse. IRDA. 1 p.

van der Laan, M., Annandale, J.G., Bristow, K.L., Stirzaker, R.J., Du Preez, C.C. et Thorburn, P.J. 2014. Modelling nitrogen leaching: Are we getting the right answer for the right reason? Agric Water Manag. 133:74–80.

Vashisht, B.B., Nigon, T., Mulla, D.J., Rosen, C., Xu, H., Twine, T. et Jalota, S.K. 2015. Adaptation of water and nitrogen management to future climates for sustaining potato yield in Minnesota: Field and simulation study. Agr Water Manage. 152(3): 198–206.

Vos, J. 1994. Effects of dicyandiamide on potato performance. J Agr Crop Sci. 173: 93–99.

Vos, J. 2009. Nitrogen responses and nitrogen management in potato. Potato Res. 52(4): 305–317.

Waddell, J.T., Gupta, S.C., Moncrief, J.F., Rosen, C.J. et Steele, D.D. 1999. Irrigation and nitrogen management effects on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake. Agron J. 91(6): 991–997.

Weill, A. et Duval, J. 2009. Rotation et engrais verts – Chapitre 9 « Engrais verts ». Manuscrit du Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée. Equiterre. 18 p.

Wendroth, O., Schwab, G., Egli, D., Kumudini, S., Mueller, T. et Murdock L. 2007. In-season observation of wheat growth status for yield prediction : do different optical sensors give us the same answer? Department of Plant and Soil Sciences. University of Kentucky. Princeton. 7 p.

Westcott, M.P., Stewart, V.R. et Lund, R.E. 1991. Critical petiole nitrate levels in potato. Agron J. 83: 844-850.

Westermann, D.T. et Sojka, R.E. 1996. Tillage and nitrogen placement effects on nutrient uptake by potato. Soil Sci Soc Am J. 60: 1448-1453.

Westermann, D.T. 2005. Nutritional requirements of potatoes. Am J Potato Res. 82: 301-307.

Whitley, K.M. et Davenport, J.R. 2003. Nitrate leaching potential under variable and uniform nitrogen fertilizer management in irrigated potato systems. Horttechnology. 13(4): 605–609.

Wilson, M.L., Rosen, C.J. et Moncrief, J.F. 2010 Effects of polymer-coated urea on nitrate leaching and nitrogen uptake by potato. J Environ Qual. 39: 492–499.

Wu, J., Wang, D., Rosen, C.J., Bauer, M.E. 2007. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. Field Crops Res. 101:96–103.

Yamaguchi, J. et Tanaka, A. 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. Soil Sci Plant Nutr. 36: 483–493.

Yang, X.M., Drury, C.F., Reynolds, W.D. et Tan, C.S. 2008. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon. Soil Tillage Res. 100:120-124.

Yu, Q., Ma, J., Zou, P., Lin, H., Sun, W., Yin J., et Fu, J. 2015. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus nitrification inhibitor DMPP on nitrogen runoff loss in vegetable soils. Environ Sci Pollut Res Int. 22(1): 472–81.

Zaman, M., Saggar, S., Blennerhassett, J.D. et Singh, J. 2009. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. Soil Biol Biochem. 41: 1270–1280.

Zebarth BJ, Rees H, Tremblay N, Fournier P, Leblon B. 2003. Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the “N Sensor”. Acta Hort (ISHS) 627:267–273.

Zebarth, B.J. et Milburn, P.H. 2003. Spatial and temporal distribution of soil inorganic nitrogen concentration in potato hills. Can J Soil Science. 83: 183–95.

Zebarth, B.J., Tai, G., Tarn, R., de Jong, H. et Milburn, P.H. 2004a. Nitrogen use efficiency characteristics of commercial potato cultivars. Can J Plant Sci. 84(2): 589–598.

Zebarth, B.J., Leclerc, Y. et Moreau, G. 2004b. Rate and timing of nitrogen fertilization of Russet Burbank potato: Nitrogen use efficiency. Can J Plant Sci. 84: 845-854.

Zebarth, B.J., Leclerc, Y., Moreau, G. et Botha, E. 2004c. Rate and timing of nitrogen fertilization of Russet Burbank potato: Yield and processing quality. Can J Plant Sci. 84: 855-863

Zebarth B.J, Rosen C.J. 2007. Research Perspective On Nitrogen BMP Development for Potato. Am J Potato Res. 84: 3–18.

Zebarth, B.J., Drury, C.F., Tremblay, N. et Cambouris, A.N. 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. Can J Soil Sci. 89(2): 113–132.

Zebarth, B.J., Tai, H., Luo, S., Millard, P., De Koeyer, D., Li, X-Q., Xiong, X. 2011. Differential gene expression as an indicator of nitrogen sufficiency in field-grown potato plants. Plant Soil 345:387–400.

Zebarth, B.J., Snowdon, E., Burton, D.L., Goyer, C. et Dowbenko, R. 2012. Controlled release fertilizer product effects on potato crop response and nitrous oxide emissions under rain-fed production on a medium-textured soil. Can J Soil Sci. 92(5): 759–769.

Zebarth, B.J., Danielescu, S., Nyiraneza, J., Ryan, M.C., Jiang, Y., Grimmett, M., et Burton, D.L. 2015. Controls on nitrate loading and implications for BMPs under intensive potato production systems in Prince Edward Island, Canada. Groundw Monit Remediat. 35(1): 30–42.

Zerulla, W., Barth, T., Dressel, J., Erhardt K., von Locquenghien, K.H., Pasda G., Rädle, M. et Wissemeier, A.H. 2001. 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) - a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. Biol Fertil Soils. 34: 118–125.

Zhou, Z., Andersen, M.N., Plauborg, F. et Edlefsen, O. 2015. Response of potato to drip and gun irrigation systems. Agric Eng Int : CIGR Journal. Special issue 2015. 9 p.

Ziadi, N., Gagnon, B. et Cambouris, A. 2007. Utilisation des engrais minéraux azotés en grandes cultures : description des différentes formes et leurs impacts en agroenvironnement. CRAAQ-OAQ Colloque sur l'azote. 29 p.

Ziadi, N., Grant, C., Samson, N., Nyiraneza, J., Bélanger, G. et Parent, L.E. 2011. Efficiency of controlled release nitrogen in potato production in eastern Canada. Agron J. 103: 60–66.

Ziadi, N., Zebarth, B.J., Bélanger, G. et Cambouris, A.N. 2012. Soil and Plant Tests to Optimize Fertilizer Nitrogen Management of Potatoes. Dns He et coll. (eds.), Sustainable Potato Production: Global Case Studies. Chapitre 11. pp. 187-207.

Zielke R.C. et Christenson D.R. 1986. Organic carbon and nitrogen changes in soil under selected cropping systems. Soil Sci Soc Am J. 50:363-367.

Zhou, M. et Butterbach-Bahl, K. 2013. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems. Plant Soil. 374(1): 977-991.

Zotarelli, L., Dukes, M. D., Scholberg, J. M., Hanselman, T., Le Femminella, K. et Muñoz-Carpena, R. 2008. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil. Sci Hortic-Amsterdam. 116(1): 8–16.

Zvomuya, F. et Rosen, C. J. 2001. Evaluation of polyolefin-coated urea for potato production on a sandy soil. HortScience. 36: 1057-1060.

Zvomuya, F., Rosen, C.J., Russelle, M.P. et Gupta, S.C. 2003. Nitrate leaching and nitrogen recovery application of polyolefin-coated urea to potato. J Environ Qual. 32: 480-48.

Annexe 1. Liste des intervenants interrogés

Marie-Pascale Beaudoin, conseillère horticole, MAPAQ, Direction régionale du Saguenay - Lac-Saint-Jean

Daniel Bergeron, agronome, M.Sc., conseiller horticole, MAPAQ, Direction régionale de la Capitale-Nationale

Athyna Cambouris, agronome, Ph.D., chercheure en sols, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Mélissa Gagnon, agronome, conseillère horticole, MAPAQ, Direction régionale de Montréal-Laval-Lanaudière

Isabelle Giroux, B.Sc. Géographie, M.Sc. Sciences de l'eau, responsable du suivi environnemental des pesticides, MDDELCC, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Service de l'information sur les milieux aquatiques

Amélie Lepage, T.P, conseillère horticole, Club Conseil Poussée de croissance

Philippe Parent, agronome, M.Sc. professionnel de recherche, Patates Dolbec

Stéphane Perreault, agronome, conseiller spécialisé pommes de terre, La Coop fédérée

Guy Roy, agronome, expert horticole, Synagri