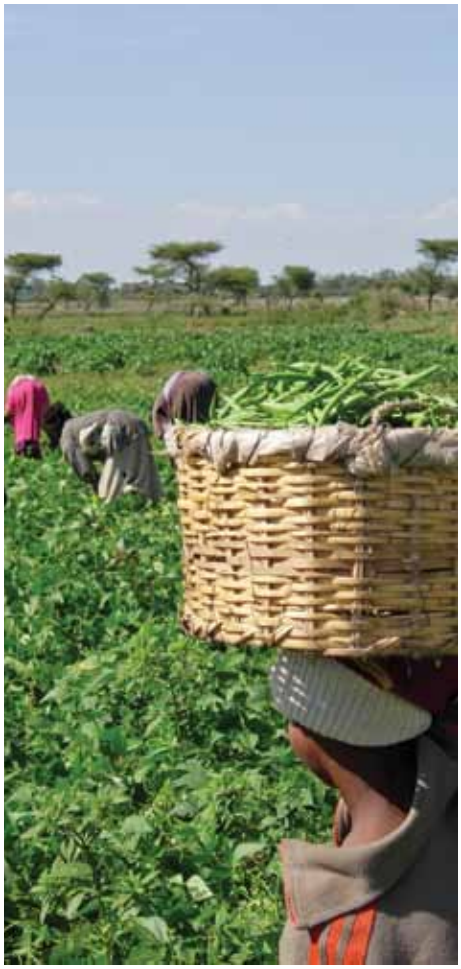
Matériel éducatif de biologie végétale pour le deuxième cycle du secondaire des écoles du Québec

Nourrir la planète au 21e siècle

Secondaire des écoles du Québec



NUTRIENTS FOR LIFE

Nourrir la planète au 21e siècle

Remerciements

Ce matériel éducatif canadien a été adapté en accord avec la Fondation des nutriments pour la vie des États-Unis et la Biological Sciences Curriculum Study (BSCS), en 2008.

Équipe canadienne chargée de l'adaptation

Maurice DiGiuseppe, *Ph.D., directeur de projet,University of Ontario Institute of Technology*
Isha DeCoito, *Ph.D., coordonnateur de projet, York University*
Xavier Fazio, *Ph.D., Brook Univeristy*
Liza Karunakaran, *Toronto Catholic Distrit School Board*
Michelle Lemieux, *Peel District School Board*
Jane Petrovich, *Toronto District School Board*

Conseiller scientifique

Tom Jensen, Ph.D. en agronomie, directeur régional, International Plant Nutrition Institute

Fondation canadienne des nutriments pour la vie

Roger Larson, *président*
Tim Woods, *Directeur exécutif*
Tanya Black, *Agente des communications et des affaires publiques*
Lynelle Spring, *Conseillère éditorial*

Membres du conseil de la Fondation canadienne des nutriments pour la vie

Bob Adamson, M.Ed., (president), Pembina Trails School District
Maurice DiGiuseppe, Ph.D., Ontario Instite for Studies in Education of the University of Toronto (OISE/UT)
Tom Jensen, Ph.D., International Plant Nutrition Institute
Yvan Lacroix, Association professionnelle en nutrition des cultures (APNC)
Rick Wishart, Ph.D., Ducks Unlimited Canada
Doug Beever, Agrium inc.
Fred Gill (secrétaire), Saskferco
Sylvain Lavoie (vice-président), Yara
Hugh Loomans (président), Sylvite
Al Raine, James Richardson International
Rick Rempel, Agrico Canada ltée

Institut canadien des engrais

© 2008. Tous droits réservés à la Fondation canadienne des nutriments pour la vie. Vous avez la permission de reproduire des parties de ce document seulement à des fins pédagogiques. La permission de reproduire ce document n'est pas valide pour tout autre usage. Pour obtenir une autorisation ou d'autres permissions en vertu de ce droit d'auteur, veuillez communiquer avec la Fondation canadienne des nutriments pour la vie, 350, rue Sparks, bureau 802, Ottawa, Ont., K1R 7S8, www.nutrientsforlife.ca, info@nutrientsforlife.ca.

Équipe auteur de la BSCS

Mark V. Bloom, *Ph.D., directeur de projet et auteur*

Fondation des nutriments pour la vie

Kathy Mathers, *directrice exécutive*

Conseiller de la Smithsonian Institution

Patrick Megonigal, Smithsonian Environmental Research Centre, Edgewater, Maryland

© 2007 par la BSCS et la Fondation des nutriments pour la vie. Tous droits réservés. Vous avez la permission de reproduire des parties de ce document seulement à des fins pédagogiques. La permission de reproduire ce document n'est pas valide pour tout autre usage. Pour obtenir une autorisation ou d'autres permissions en vertu de ce droit d'auteur, veuillez communiquer avec la BSCS, 5415 boul. Mark Dabling., Colorado Springs, CO 80918-3842, www.bscs.org,, info@bscs.

Références photographiques

Figure 1	*International Plant Nutrition Institute*
Figure 2	*BSCS*
Figure 3	*BSCS*
Figure 4	*BSCS*
Figure 5	*Fondation des nutriments pour la vie*
Figure 6	*The Mosaic Company*
Figure 7	*The Mosaic Company*
Figure 8	*The Mosaic Company*
Figure 9	*Fondation des nutriments pour la vie*
Figure 10	*iStock Photo*
Figure 12	*iStock Photo*
Figure 13	*CropLife Magazine*
Figure 1.1	*BSCS*
Document 1.1	*Agrium inc.*
Document 1.2	*BSCS*
Document 1.3	*BSCS*
Document 1.4	*BSCS*
Document 1.5	*Agrium inc.*
Document 1.6	*Agrium inc.*
Figure 2.1	*BSCS*
Figure 2.2	*BSCS*
Figure 2.3	*BSCS*
Figure 3.1	*BSCS*
Figure 3.2	*BSCS*
Figure 3.3	*BSCS*
Document 3.1	*Agrium inc.*
Document 3.2	*BSCS*
Document 3.3	*Dreamstime*
Document 3.4	*BSCS*
Document 3.5	*Dreamstime*
Figure 4.1	*The Mosaic Company*
Document 4.1	*International Plant Nutrition Institute*
Document 4.3	*The Mosaic Company*
Document 4.5	*The Mosaic Company*
Figure 5.1	*BSCS*
Document 5.2a	*BSCS*
Document 5.2b	*Agrium inc.*
Figure 6.1	*EyeWire*
Document 6.1	*Agrium inc.*
Document 6.2	*BSCS*
Document 6.3	*Agrium inc.*

Préface :

Focus : Fondation canadienne des nutriments pour la vie

Nourrir la planète au 21e siècle est un outil d'enseignement qui vise à aider les enseignants et les étudiants à explorer une question centrale :

Comment pouvons-nous nous assurer que la population croissante de la Terre soit alimentée de façon durable dans les décénies à venir?

Cette question complexe pourrait conduire à une exploration approfondie de nombreux facteurs sociaux, environnementaux, ainsi qu'à des questions scientifiques et éthiques.

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a identifié les éléments clés de gérance dans leur publication du 10 décembre 2007 à Rome. Dr. Jacques Diouf, le directeur-général de la FAO a dit :« Les principaux éléments nécessaires pour nourrir le monde aujourd'hui et à l'avenir sont les suivants: une augmentation des investissements publics et privés dans l'agriculture, le bon choix des politiques et des technologies et le renforcement des connaissances et des capacités, dans le cadre d'une gestion rationnelle des écosystèmes. Il n'y a pas de solution unique au problème de l'alimentation des victimes de la faim et des pauvres de la planète. »

Tout en respectant le mandat de nutriments pour la vie, nous nous concentrons sur un aspect important de ces enjeux :

Comment comprendre la science de la biologie végétale et comment cela est relié à la production alimentaire?

Ce matériel tisse un lien avec certains éléments sociaux et environnementaux qui pose problèmes, tout en maintenant un accent sur les aspects scientifiques de la question centrale comment nourrir un monde qui s'affame. Nous reconnaissons qu'il y a plusieurs éléments qui peuvent être reliés à cette question et nous encourageons les enseignants à compléter ce matériel en y ajoutant des sources supplémentaires de leur choix pour élargir l'apprentissage des étudiants sur les débats sociaux et environnementaux.

Un mot sur l'intendance

La loi canadienne défini le terme « engrais » dans la loi sur les engrais :

> Un engrais est une substance ou mélange de substances, contenant de l'azote, du phosphore, du potassium ainsi que tout autre élément nutritif des plantes, fabriqué ou vendu à ce titre ou représenté comme tel.

Afin d'éviter toute interprétation erronée, nutriments pour la vie a remplacé, dans le curriculum des ressources, l'utilisation du terme « engrais » par « nutriments des plantes » ou « nutriments des cultures » sauf si le nutriment est identifé – par exemple « le fumier ». Dans ces documents de référence, le terme « nutriment » sera utilisé de façon générale, les engrais commerciaux, minéraux et innorganiques seront utilisés pour désigner ceux qui sont fabriquées ou extraites de nutriments et les sources d'engrais organiques comprennent les biosolides, le fumier, le compost, les légumineuses et les cultures d'engrais vertes, etc.

La Fondation conseille l'utilisation judicieuse de tous les nutriments des plantes – leur application lors de la saison de croissance, ainsi que la quantité appropriée selon l'emplacement cela est une question d'intendance de l'environnement et est spécifiquement approuvé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

La Fondation supporte l'intendance environnementale de tous les nutriments des plantes et notre objectif est, en tout temps, d'identifier l'importance des principes scientifiques sous-jacents à l'agriculture et la production alimentaire.

Nourrir la planète au 21e siècle

Table des matières

Préface : *Focus : Fondation canadienne des nutrients pour la vie* 4

Introduction à *Nourrir la planète au 21e siècle* 7

- Quels sont les objectifs de ce module?
- Pourquoi enseigner ce module?
- Qu'est-ce que l'enseignant peut en tirer?

Intégrer le module 10

- Quels sont les objectifs de ce module?
- Quels sont les concepts scientifiques et comment sont-ils reliés?
- Qu'est-ce qui n'est pas couvert dans ce module?
- Quel lien y a-t-il entre ce module et le programme éducatif de sciences et technologie du deuxième cycle du secondaire?
- De quelle façon le modèle éducationnel « 5E » de BSCS peut-il promouvoir un apprentissage actif, collaboratif et fondé sur la recherche scientifique?
  - Entreprendre
  - Explorer
  - Expliquer
  - Élaborer
  - Évaluer
- De quelle façon le module permet-il de faire des évaluations continues?
- Comment les enseignants peuvent-ils promouvoir la sécurité dans la classe de sciences?
- De quelle façon peut-on traiter les sujets controversés en classe?

Comment utiliser les leçons 33

- Format des leçons
- Calendrier du module

Notions additionnelles pour l'enseignant 35

1.0 Introduction 35
2.0 Les plantes et leurs éléments essentiels 36
3.0 Les propriétés des sols 38
4.0 Les interactions plantes-sols 40

suite à la page suivante

5.0 Le système vasculaire des plantes 41
6.0 Les carences en nutriments des plantes 42
7.0 Nourrir les plantes avec des nutriments pour plantes 44
7.1 L'azote (le bâtisseur) 45
7.2 Le phosphore (la source d'énergie) 46
7.3 Le potassium (le régulateur) 47
7.4 Le soufre (le synthétiseur) 48
7.5 Les oligo-éléments 48
7.6 Les engrais organiques et commerciaux 48
7.7 Répondre aux besoins en nutriments des cultures 49
7.8 Organique ou commercial : lequel est le meilleur? 51
8.0 Les nutriments végétaux et l'environnement 52
8.1 La pollution par les nutriments 53
8.2 La gestion des engrais à gazon 54
8.3 L'utilisation des terres 55
9.0 La technologie et la gestion des nutriments 55
10.0 Conclusion 57

Références 59

Glossaire 61

Leçons pour les élèves

- Leçon 1, *À la recherche de nutriments* 63
- Leçon 2, *Les propriétés des sols* 81
- Leçon 3, *Les interactions plantes-sols* 95
- Leçon 4, *Les carences en nutriments des plantes* 111
- Leçon 5, *Les nutriments végétaux et l'environnement* 131
- Leçon 6, *Nourrir la planète au 21e siècle* 151

Nourrir la planète au 21e siècle

Introduction

Au cours des cinquante dernières années, la population mondiale a plus que doublé, mais la superficie des terres consacrées à l'agriculture est demeurée à peu près la même. Au cours de la même période, ce monde a évolué et a fait des progrès remarquables en matière de production agricole. Cette « révolution verte » a permis aux agriculteurs de l'Amérique du Nord de produire de 300 à 400 pour cent plus de nourriture sur les mêmes terres agricoles utilisées dans les années 1960. Grâce à cette augmentation du rendement, plus de 50 millions de kilomètres carrés de terres n'ont pas eu à être labourés. Ce qui représente une superficie importante de terres qui peuvent être utilisées à d'autres fins.[6]

Les agriculteurs ont pu augmenter le rendement de leurs cultures grâce à une sélection des meilleures variétés de plantes, à une meilleure gestion de l'eau et à une utilisation plus judicieuse des engrais commerciaux et des nutriments complémentaires tels que le fumier, le compost. La gestion des engrais consiste à s'assurer que le bon type de nutriment est utilisé au bon moment, que la bonne quantité est utilisée en fonction des besoins de la plante et que les engrais sont placés à un endroit stratégique pour répondre aux besoins de la plante. Cela joue un grand rôle dans l'accroissement de la production agricole, tout en réduisant les pertes de nutriments dans l'environnement. Au moins 40 pour cent de l'approvisionnement alimentaire mondial sont attribuables à l'utilisation complémentaire des engrais pour remplacer les nutriments qui ont été retirés du sol par la pratique de l'agriculture et de la consommation alimentaire loin des fermes.

Selon une estimation, il y aura de 8 à 9 milliards de personnes sur la terre d'ici à 2050.[29] Comment allons-nous nourrir toute cette nouvelle population? Dans ce monde ayant évolué, l'augmentation de la productivité agricole attribuable à la révolution verte est sur le point d'atteindre une certaine limite. Au même moment, à l'autre bout de la planète, la pression qu'exercent les infrastructures et l'augmentation de la population forcent les agriculteurs de l'Afrique subsaharienne à exploiter le sole après les récoltes, en ayant recours à l'exploitation minière ce qui retire ainsi les nutriments du sol sans toutefois les remplacer. Ayant peu accès à des nutriments complémentaires, les agriculteurs n'ont d'autres choix que d'utiliser des sols moins fertiles qui contiennent de la terre de mauvaise qualité pour pratiquer l'agriculture, aux dépens de la faune et des forêts de l'Afrique.

Depuis longtemps, les Canadiens ne pratiquent plus l'agriculture et tiennent maintenant leur approvisionnement alimentaire pour acquis. Ils s'attendent à ce que la nourriture soit savoureuse, abordable, saine et nutritive. Cependant, ils s'attendent également à ce que les systèmes agricoles ne nuisent pas à l'environnement ni à la faune.

Certaines décisions difficiles devront être prises à cet égard. Si l'on fait plus de place à l'agriculture, il y aura moins de terres disponibles pour construire des maisons, pour profiter de nos loisirs préférés et pour préserver les habitats fauniques. Les pratiques agricoles, lorsqu'elles ne sont pas gérées correctement, peuvent nuire à l'environnement par un apport excessif d'engrais dans les rivières, les lacs et les eaux

côtières. Dans l'agriculture, tout comme dans plusieurs autres industries, l'expérience des agriculteurs et la recherche scientifique ont permi d'établir les meilleures pratiques de gestion, c'est-à-dire des pratiques qui assurent une utilisation efficace des ressources et qui permettent de limiter les effets négatifs sur l'environnement. La FAO des Nations Unies a identifié le cadre de travail de la gestion judicieuse des ressources agricoles dans leur communiqué du 10 décembre 2007, à Rome. Le Dr. Jacques Diouf, directeur-général de la FAO a dit : « "Il faut choisir les bons intrants et le bon dosage, les appliquer selon les règles et au moment voulu. » Ce système favorise une rentabilité agricole pour les agriculteurs, tout en respectant le bien commun.

Le public a besoin d'une « voix » lorsque vient le temps de mettre sur pied des politiques qui ont une incidence sur la façon de produire les aliments. Pour prendre des décisions rationnelles sur ces questions, les citoyens du monde doivent connaître leurs options. Les jeunes d'aujourd'hui doivent aussi connaître les conséquences économiques, sociales et environnementales de chacune des options auxquelles ils seront confrontés comme adultes, face au défi de l'approvisionnement alimentaire d'une population mondiale sans cesse croissante.

Quels sont les objectifs de ce module?

Nourrir la planète au 21e siècle compte quatre objectifs. Le premier consiste à aider les élèves à comprendre certains aspects fondamentaux de la biologie végétale en lien avec la production alimentaire. Bien que le programme éducatif aborde déjà la biologie végétale et la production agricole, ce module se concentre surtout sur la compréhension de la photosynthèse. L'importance de la nutrition des sols et des plantes en relation avec la production alimentaire demeure souvent inexplorée en milieu scolaire.

Le deuxième objectif consiste à donner aux élèves l'occasion de mettre en pratique et de développer leur pensée critique. Cette compétence s'avère importante non seulement lors des activités scientifiques, mais aussi lors des prises de décisions dans la vie de tous les jours. Notre monde sans cesse changeant exige que les jeunes d'aujourd'hui continuent d'acquérir des connaissances tout au long de leur vie. De plus, ils doivent être en mesure d'évaluer l'information provenant d'une variété de sources et de juger de son utilité. Ils doivent également faire la distinction entre la science objective, précise et partiale ainsi que l'information provenant de sources externes à la communauté scientifique qui peut être trompeuse et impartiale. Ils doivent apprendre à reconnaître comment des lacunes ou les omissions dans les bases de données peut influencer leur capacité à prendre des décisions rationnelles. Les élèves doivent être capables d'utiliser les observations pour établir une relation de causalité.

Le troisième objectif consiste à expliquer aux élèves le but et les méthodes utilisées lors d'une recherche scientifique. Les recherches en cours affectent la façon dont nous comprenons le monde qui nous entoure et nous fournissent une base pour améliorer nos choix concernant notre santé et la santé de notre communauté, y compris celle de l'environnement. Dans ce module, les élèves participent à des activités qui leur font vivre des expériences tout en touchant aux principaux aspects de la recherche scientifique. Les leçons de ce module encouragent les élèves à réfléchir sur les relations entre les connaissances, les choix, les comportements et la santé de l'humain de la façon suivante :

connaissances* (ce qui est connu et ce qui ne l'est pas) + *choix* = *pouvoir

pouvoir* + *comportement* = *meilleure santé de l'homme

Le dernier objectif de ce module consiste à encourager les élèves à penser en termes de relation, à l'heure actuelle et tout au long de leur vie.

Pourquoi enseigner ce module?

Les classes de biologie à l'école secondaire offrent un cadre idéal pour intégrer les nombreux domaines d'intérêt des élèves. Dans ce module, les élèves participent à des activités qui intègrent la recherche scientifique, la biologie végétale et les mathématiques et qui leur permettent de répondre aux attentes de ce module. Les leçons abordent les sciences, la technologie et certaines questions de société. Le contexte bien réel des leçons est captivant, et les connaissances acquises peuvent être appliquées dans la vie de tous les jours.

Qu'est-ce que l'enseignant peut en tirer?

Nourrir la planète au 21e siècle correspond à plusieurs des critères d'évaluation établis par le programme et utilisés par les enseignants :

- Le module est *fondé sur des normes* et répond au programme éducatif provincial en matière de sciences.[19, 20] Il accorde une attention particulière aux connaissances que les élèves doivent acquérir et mettre en pratique en lien avec la *recherche scientifique*.
- Il s'agit d'un module ***intégré***, dont le contenu s'inspire largement des sciences, des sciences sociales, des mathématiques et des sciences de la santé.

De plus, le module fournit un moyen de poursuivre le *développement professionnel* des enseignants. Ces derniers peuvent explorer de nouvelles pratiques d'enseignement telles que celles décrites dans ce module, sans toutefois repenser le programme éducatif. Dans le livre *Designing Professional Development for Teachers of Science and Mathematics,* Loucks-Horsley, Hewson, Love et Stiles ont rédigé des suppléments tels que celui-ci « offer a window through which teachers get a glimpse of what new teaching strategies look like in action » (offre une fenêtre par laquelle les enseignants peuvent jeter un coup d'œil sur de nouvelles stratégies d'enseignement). L'utilisation de ce type de supplément au module peut encourager la réflexion et la discussion, et inciter les enseignants à améliorer leurs pratiques en mettant l'accent sur l'apprentissage par les expériences.

Intégration du module

Les six leçons de ce module ont été conçues pour être enseignées dans l'ordre, sur une période de sept à huit jours (comme supplément au programme déjà établi) ou comme leçons individuelles, comme appui et enrichissement à certains concepts enseignés aux cours de biologie à l'école secondaire. Cette section vous suggère des façons d'utiliser ce matériel dans votre classe. Vous trouverez également des suggestions spécifiques aux procédures de chaque leçon.

Quels sont les objectifs de ce module?

Nourrir la planète au 21e siècle aide les élèves à atteindre quatre objectifs principaux en lien avec la culture scientifique :

- comprendre un ensemble d'éléments de base liés à la production alimentaire;
- faire l'expérience d'une recherche scientifique et avoir une meilleure compréhension de la nature et des méthodes scientifiques;
- perfectionner sa pensée critique;
- reconnaître le rôle de la science dans la société et le lien entre la science fondamentale et la santé humaine.

Quels sont les concepts scientifiques et comment sont-ils liés?

Les leçons sont organisées en un cadre conceptuel qui permet aux élèves de prendre ce qu'ils savent déjà (ou croient savoir) à propos de l'agriculture et de se forger un point de vue plus complet et plus précis sur le sujet. Les élèves commencent par comparer et distinguer les besoins nutritionnels des plantes et des gens (Leçon 1, *À la recherche de nutriments*). Ensuite, ils explorent les sols et examinent comment ils diffèrent chimiquement et physiquement les uns des autres, particulièrement en ce qui concerne les éléments essentiels à la croissance des plantes (Leçon 2, *Les propriétés des sols*).

Les élèves portent ensuite leur attention sur l'anatomie des plantes. Ils examinent le rôle du système racinaire, ainsi que celui du xylème et du phloème. Une activité pratique leur permet de voir comment

se déplacent les nutriments par la diffusion (Leçon 3, *Les interactions plantes-sols*). Les élèves prennent conscience de ce qui se produit lorsque les plantes ne reçoivent pas les quantités suffisantes de nutriments essentiels. Les élèves jouent le rôle de soigneur de plantes et posent un diagnostic sur la cause d'une carence nutritionnelle (Leçon 4, *Les carences en nutriments des plantes*). Ensuite, les élèves examinent le rôle des engrais minéraux à l'échelle mondiale. Ils étudient la façon dont les engrais peuvent aider la production agricole et ainsi nourrir la population, tout en protégeant l'environnement. Les conséquences d'une mauvaise utilisation des nutriments des plantes sont également étudiées (Leçon 5, *Les nutriments végétaux et l'environnement*). Le module se termine avec les réflexions des élèves sur ce qu'ils ont appris sur la biologie végétale, les nutriments complémentaires et les effets des engrais sur l'environnement, sous forme de recommandations pour les pratiques agricoles de l'avenir (Leçon 6, *Nourrir la planète au 21e siècle*). Le tableau 1 démontre le contenu scientifique et théorique des leçons.

Tableau 1.
Contenu scientifique et cheminement théorique

Leçon et apprentissage*	Sujets traités et principaux concepts
1 : À la recherche des nutriments *Entreprendre* : les élèves s'intéressent à la façon dont les plantes se nourrissent.	Les plantes et les humains ont besoin de nutriments pour accomplir leur cycle de vie. Les macroéléments sont nécessaires en plus grande quantité que les oligo-éléments. Les plantes puisent leurs nutriments dans l'eau, l'air et le sol.
2 : Les propriétés des sols *Explorer* : les élèves observent les facteurs qui font qu'un sol peut favoriser davantage la croissance d'une plante par rapport à un autre.	Les sols diffèrent selon la quantité de matières organiques et inorganiques qu'ils contiennent. Certains sols retiennent et dispersent l'eau de façon plus efficace que d'autres. Les plantes absorbent généralement tout ce qui est dissous dans l'eau des sols.
3 : Les interactions plantes-sols *Expliquer* : les élèves font des observations et des expériences afin de déterminer la façon dont les plantes se procurent les nutriments dans le sol.	Les plantes extraient leurs nutriments des sols. En majeure partie, les nutriments pénètrent dans le système racinaire par diffusion. L'eau et les nutriments voyagent par le xylème et le phloème respectivement.
4 : Les carences en nutriments des plantes *Élaborer :* les élèves approfondissent leur compréhension des besoins en nutriments des plantes en diagnostiquant une carence en nutriment chez certaines plantes.	Les plantes cultivées carencées en nutriments comportent des symptômes particuliers. Ces carences peuvent être corrigées en utilisant des nutriments qui rétablissent l'équilibre des nutriments dans le sol.
5 : Les nutriments végétaux et l'environnement *Expliquer et élaborer* : les élèves appliquent leurs connaissances sur la gestion des nutriments à l'échelle mondiale et examinent comment l'utilisation accrue des engrais affectera l'environnement.	L'ajout de nutriments à partir de bio-solides ou d'engrais commerciaux augmente la quantité de nourriture et de fibres produites par hectare, et par le fait même, réduit la quantité de terres nécessaires à l'agriculture. Notre population croissante requiert de plus en plus de nourriture. À moins que le rendement agricole ne puisse suffire à cette demande croissante, plus de terres devront être consacrées à l'agriculture.
6 : Nourrir la planète au 21e siècle *Évaluer :* les élèves appliquent ce qu'ils ont appris dans ce module et émettent des recommandations sur les façons de nourrir la population croissante de la planète.	L'augmentation de la population mondiale nous impose un changement au niveau des pratiques agricoles afin de répondre aux besoins nutritionnels, tout en limitant les conséquences environnementales telles qu'une carence en nutriments, l'érosion et l'utilisation excessive des terres.

*Voir De quelle façon le modèle éducationnel « 5E » de BSCS peut-il promouvoir un apprentissage actif, collaboratif et fondé sur la recherche scientifique?

Qu'est-ce qui n'est pas couvert dans ce module

Les leçons abordent les nutriments des plantes dans un contexte agricole. Certaines des descriptions conceptuelles que l'on retrouve dans ce module s'appliquent autant aux espèces végétales cultivées et non cultivées, mais dans plusieurs cas, elles ne s'appliquent pas aux espèces non cultivées et aux écosystèmes non agricoles. Aux fins de ce module, nous définissons les espèces cultivées de façon générale, c'est-à-dire la culture vivrière, les pelouses, les jardins et les plantes ornementales telles que les fleurs.

En accord avec notre objectif déclaré sur la compréhension de la science de la biologie végétale en ce qui a trait à la production alimentaire mondiale, nous avons pris soin de respecter la frontière de ce que nous pouvons et ne pouvons pas discuter de façon réaliste dans ce module.

Afin d'aborder davantage la contribution des engrais à l'agriculture, certains sujets connexes ne sont pas détaillés dans ce module, notamment les effets complexes de l'enrichissement en nutriments sur les écosystèmes de terres non aménagées tels que les forêts, les zones humides, les déserts et les prairies. La gestion des cultures joue un rôle important dans la réduction des pertes de nutriments dans l'environnement, par exemple la culture de couverture,c'est-à-dire la culture de plantes afin d'assurer une protection des sols et non aux fins de culture, et l'influence des pratiques de gestion des sols sur les pertes de nutriments dans l'environnement, par exemple, en utilisant des tuyaux de drainage sous-terrains pour éliminer rapidement le ruissellement d'eau des terres agricoles. Le module met aussi l'accent sur les impacts/bénéfices environnementaux en aval de tous les types de nutriments complémentaires pour les plantes.Les enjeux associés à la production d'engrais organiques ou commerciaux ne sont pas abordés.

Quel lien y a-t-il entre ce module et le programme éducatif de science et technologie du deuxième cycle du secondaire?

Nourrir la planète au 21e siècle appuie le personnel enseignant dans ses efforts visant à répondre aux attentes du programme de science et technologie du deuxième cycle du secondaire. Le tableau 2 dresse la liste des attentes du programme qui sont traitées dans ce module.

Tableau 2.
Liens entre les attentes du programme de science et technologie deuxième cycle du secondaire et *Nourrir la planète au 21e siècle*

Compétence	Attentes de fin de cycle	Leçons correspondantes de *Nourrir la planète au 21e siècle*
1 : Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique	À la fin du deuxième cycle du secondaire, l'élève est en mesure de mettre en oeuvre un processus de résolution de problèmes. Il s'approprie le problem en dégageant le but à atteindre ou le besoin à cerner ainsi que les conditions à respecter. Il formule ou reformule des questions qui s'appuient sur des données issues du problème. Il propose des hypothèses vraisemblables ou des solutions possibles, qu'il est en mesure de justifier. Il élabore sa planification en sélectionnant les démarches qui lui permettront d'atteindre son but. Il contrôle les variables importantes qui peuvent influencer les résultats. Dans l'élaboration de son plan d'action, il choisit les outils conceptuels et le matériel pertinents parmi ceux qui sont mis à sa disposition. Il concrétise son plan d'action en travaillant de façon sécuritaire et l'ajuste au besoin. Il recueille des données valables en utilisant correctement le matériel choisi. Il tient compte de la précision des outils ou des équipements. En science, il analyse les données recueillies et en tire des conclusions ou des explications pertinentes. En technologie, il procède à la mise à l'essai de sa solution en s'assurant que cette dernière répond au besoin ciblé ou aux exigences du cahier des charges. S'il y a lieu, il énonce de nouvelles hypothèses ou propose des améliorations à sa solution ou de nouvelles solutions. Il a recours, si cela est nécessaire, aux technologies de l'information et de la communication.	Toutes les Leçons, mais surtout Leçons 3 et 6
2: Mette à profit ses connaissances scientifiques et technologiques	À la fin du deuxième cycle du secondaire, l'élève est en mesure d'analyser des situations ou de réagir à des questionnements liés à de grandes problématiques tirées du quotidien, de l'actualité, etc. Il les aborde sous l'angle de la science et de la technologie. Il circonscrit la problématique en explorant divers aspects (sociaux, environnementaux, économiques, politiques, etc.) et en dégage, s'il y a lieu, les principaux enjeux éthiques. Quand cela est pertinent, il est à même d'évaluer les retombées à long terme liées aux enjeux soulevés. Lorsque l'élève analyse un problème sous l'angle de la science, il tente de reconnaître les principes en cause. Au regard de ces principes, il formule une explication ou une solution provisoire qu'il valide en s'appuyant sur les concepts, les lois, les théories et les modèles pertinents. Il est en mesure de décrire de manière qualitative ces principes scientifiques et, lorsque la situation l'exige, il peut recourir au formalisme mathématique pour justifier son explication. Lorsque l'élève analyse un problème sous l'angle de la technologie, il en détermine la fonction globale. Il examine l'objet, le système technologique ou le produit afin d'en observer les principaux elements constitutifs. Il manipule l'objet ou le système et le démonte au besoin afin d'en comprendre les principaux sous-systèmes et mécanismes. Il en décrit les principes de fonctionnement en s'appuyant sur les concepts, les lois et les modèles pertinents. Il explique les solutions retenues lors de la conception ou de la construction de l'objet technique ou du système technologique. Après avoir exploré divers aspects (sociaux, environnementaux, économiques, politiques, etc.) ou divers enjeux éthiques liés à une problématique, l'élève cherche des ressources qui expriment des points de vue différents. Il donne priorité aux informations qu'il juge importantes tout en s'assurant de la crédibilité des sources. Il se forge ainsi une opinion en s'appuyant entre autres sur des principes scientifiques et technologiques. Il est en mesure de justifier son opinion et de la reconsidérer en fonction de nouvelles informations.	Toutes les Leçons, mais surtout Leçon 6

3: Communiquer à l'aide des langages utilisés en science et technologie	À la fin du deuxième cycle du secondaire, l'élève interprète et produit, sous une forme orale, écrite ou visuelle, des messages à caractère scientifique ou technologique. Lorsqu'il interprète un message, il a recours aux langages associés à la science et à la technologie. Selon la situation, il utilise avec rigueur tant le langage scientifique, technologique, mathématique ou symbolique que le langage courant. Il tient compte de la crédibilité de la source d'information. Lorsque cela est nécessaire, il définit les mots, les concepts et les expressions en s'appuyant sur des sources crédibles. Parmi toute l'information consultée, il repère et utilise les éléments qu'il juge pertinent et nécessaires à l'interprétation juste du message. Il produit des messages structurés et clairs et les formule avec rigueur. Il respecte les conventions tout en utilisant des modes de présentation appropriés. Il choisit et utilise adéquatement des outils, dont les technologies de l'information et de la communication, qui l'aident à bien livrer son message. S'il y a lieu, il adapte son message à ses interlocuteurs. Il est en mesure d'expliciter, en langage courant, le sens du message qu'il produit ou qu'il a interprété. Quand la situation l'exige, il confronte ses idées avec celles de ses interlocuteurs. Il defend alors ses idées, mais s'ajuste quand les arguments d'autrui lui permettent de mieux préciser sa pensée. En tout temps, il respecte la propriété intellectuelle dans la production de son message.	Toutes les Leçons, mais surtout Leçon 5

Grand univers	Concepts généraux	Orientations	Concepts prescrits	Repères culturels possibles	Leçons correspondantes de *Nourrir la planète au 21e siècle*
Univers vivant	Systèmes – Fonction de nutrition *Système digestif*	L'être humain est tributaire d'un apport régulier d'aliments provenant d'autres organismes. Cet apport est indispensable, car il assure la construction et la réparation des tissus de même que la production de chaleur et d'énergie sous différentes formes (mécanique, calorifique, etc.).	■ Types d'aliments (eau, protides, glucides, lipides, vitamines, minéraux) ■ Valeur énergétique des aliments ■ Transformation des aliments (mécanique, chimique)	*Ressources du milieu* Organisation mondiale de la Santé Guide alimentaire canadien Directions régionales de la santé publique	Leçons 1, 4

	Écologie	Quant aux écosystèmes, ils se caractérisent tous par les relations qu'entretiennent les organismes d'une communauté avec les facteurs abiotiques du milieu. Grâce à l'action des organismes autotrophes, l'énergie entre dans l'écosystème et est transformée en matière organique. Cette productivité primaire (biomasse) a une influence sur la quantité d'énergie totale de l'écosystème. L'énergie solaire qui est convertie en énergie chimique est transmise d'un niveau trophique à un autre par l'intermédiaire de la nourriture et dissipée sous forme de chaleur. À tous les niveaux trophiques, des processus biologiques et géologiques rendent possible la remise en circulation des divers nutriments : on parle alors de recyclage chimique. L'action des micro-organismes et des décomposeurs est cruciale dans le processus de décomposition organique qui permet la remise en circulation des divers éléments inorganiques. Une population n'est jamais seule à occuper un territoire. Plusieurs types d'interactions biotiques se produisent entre ces populations qui constituent alors une communauté. Chaque communauté se caractérise par une structure trophique et une abondance relative des espèces qui la composent (biodiversité). La structure trophique, définie par les relations entre les organismes qui forment des réseaux alimentaires, est déterminante pour expliquer la dynamique des communautés. Ces réseaux alimentaires sont influencés à la fois par les nutriments disponibles à la base de la chaîne alimentaire et par les grands prédateurs au sommet de la pyramide alimentaire. Des modifications dans la structure et la composition des communautés surviennent lorsque des perturbations provoquent un déséquilibre. Dès lors, une série de changements s'opèrent progressivement afin de rétablir l'équilibre dans la communauté : on parle alors de successions écologiques. L'action des humains et les catastrophes naturelles sont les principaux agents de perturbation au sein des communautés.	■ Étude des populations (densité, cycles biologiques) ■ Dynamique des communautés • Biodiversité • Perturbations ■ Dynamique des écosystèmes • Relations trophiques • Productivité primaire • Flux de matière et d'énergie • Recyclage chimique	**Ressources du milieu** ■ Biodôme de Montréal ■ Aires protégées *Intervention humaine* ■ Protection de l'environnement	Leçons 2, 4, 5, 6

Univers materiel	Organisation de la matière	La matière circule, de l'inerte au vivant et inversement. En effet, qu'elle soit inerte ou vivante, la matière est constituée d'atomes qui se combinent selon leurs affinités et qui forment des molécules d'éléments ou de composés plus ou moins complexes. Au cours de l'histoire, différents modèles d'organisation de la matière ont été proposés pour expliquer ses propriétés etses transformations. Le modèle atomique de Rutherford-Bohr est abordé en tenant compte de l'existence de deux types de particules (protons et électrons) et de leur organisation. Le noyau est constitué, entre autres, de protons. Les électrons, en nombre égal à celui des protons, circulent autour du noyau. Le tableau de classification des éléments recèle une foule d'informations. Certaines sont utilisées pour expliquer des propriétés des métaux, des non-métaux et des métalloïdes, et pour prévoir des comportements en mettant en relation la structure atomique et les propriétés des éléments.	■ Substance pure (composé, élément) ■ Modèle atomique de Rutherford-Bohr ■ Familles et periods du tableau périodique	*Histoire* ■ Dimitri Mendeleïev ■ Ernest Rutherford ■ Neils Bohr ■ John Dalton *Intervention humaine* ■ Classification périodique des éléments	Leçon 1

Terre et espace	Terre *Cycles biogéochimiques*	Un cycle biogéochimique décrit le processus naturel au cours duquel un élément chimique circule à l'état organique ou minéral, au sein de la biosphère. Le cycle du carbone est régulé par l'interaction entre les plaques continentales, l'atmosphère, les océans et les organismes vivants. Par la photosynthèse, les végétaux fixent le carbone sous des formes non volatiles, mais ce sont les roches carbonatées, précipitées ou construites par les êtres vivants qui constituent le plus grand réservoir de CO_2. Bien que ce gaz soit libéré au cours d'éruptions volcaniques, les émissions anthropogéniques en modifient l'équilibre naturel. Certaines biotechnologies appliquées à l'environnement permettent d'accentuer le recyclage chimique du carbone. Bien qu'abondant, l'azote atmosphérique peut être assimilé par les végétaux uniquement par l'action de certaines bactéries. Le métabolisme des organismes vivants, ou leurs cadavres, produisent des déchets qui ramènent l'azote l'état minéral, et le cycle recommence. Des variations importantes du taux d'humidité, de la température ou du pH des sols affectent la régulation de ce cycle. Les végétaux constituent la seule source d'azote assimilable par les animaux, ce qui constitue une bonne raison de conserver la flore mondiale.	■ Cycles biogéochimiques • Cycle du carbone • Cycle de l'azote	*Ressources du milieu* ■ Agence de l'efficacité énergétique ■ Ressources naturelles Canada ■ Consortium Ouranos ■ Organisation Greenpeace	Leçon 1

Démarches, stratégies, attitudes et techniques		Leçons correspondantes de *Nourrir la planète au 21e siècle*
Démarches Diverses démarches sont présentées : les démarches de modélisation, d'observation, expérimentale, empirique, de construction d'opinion, de meme que les démarches technologiques de conception et d'analyse. Elles correspondent essentiellement aux façons de faire dans un contexte de resolution de problèmes en science et en technologie.	**Démarch e de modélisation** La démarche de modélisation consiste à construire une représentation destinée à concrétiser une situation abstraite, difficilement accessible ou carrément invisible. Le modèle élaboré peut prendre diverses formes : texte, dessin, formule mathématique, équation chimique, programme informatique ou maquette. Au fur et à mesure que progresse la démarche de modélisation, le modèle se raffine et se complexifie. Il peut être valide pendant un certain temps et dans un contexte spécifique, mais, dans plusieurs cas, il est appelé à être modifié ou rejeté. Il importe également de considérer le contexte dans lequel il a été construit. Il doit posséder certaines caractéristiques, entre autres celles de faciliter la compréhension de la réalité, d'expliquer certaines propriétés de ce qu'il vise à représenter et de prédire de nouveaux phénomènes observables.	Leçons 3, 5
	Démarche d'observation La démarche d'observation est un processus actif qui permet d'interpréter des faits selon des critères déterminés par l'observateur ainsi que par ce qui fait consensus dans un cadre disciplinaire donné. À la lumière des informations recueillies, l'élève doit en arriver à une nouvelle compréhension des faits qui reste toutefois tributaire du contexte dans lequel s'effectue l'observation. Par sa manière d'interpréter et d'organiser les informations, l'observateur fait une relecture du monde physique en tenant compte de ses présupposés et des schémas conceptuels qui font partie intégrante de la rille qu'il applique aux faits observés. Ainsi, toute observation repose déjà sur l'établissement d'un modèle théorique provenant de celui qui observe.	Leçons 2, 3
	Démarche expérimentale La démarche expérimentale implique tout d'abord la formulation de premières explications. Elle permet d'amorcer une tentative de réponse et de définir le cadre dans lequel se fera l'expérimentation. L'élève doit ensuite s'engager dans l'élaboration d'un protocole expérimental dans lequel il reconnaîtra un certain nombre de variables en vue de les manipuler. Le but du protocole sera de faire émerger des éléments observables ou quantifiables, de les mettre en relation et de les confronter aux hypothèses. Les interactions entre les diverses phases de la démarche expérimentale permettent de soulever de nouveaux questionnements, de formuler de nouvelles hypothèses, d'apporter des ajustements à sa mise en oeuvre et de prendre en compte les limites de l'expérimentation.	Leçons 2, 3

	Démarche empirique La démarche empirique est une recherche de terrain sans manipulation de variables. Cette absence de manipulation n'enlève rien à sa validité méthodologique; un sondage, par exemple, est une démarche empirique qui n'a rien d'aléatoire. Les modèles intuitifs sont bien souvent à l'origine de cette démarche. Elle peut se révéler adéquate dans certaines situations puisqu'elle permet d'explorer et de se représenter les éléments d'un problème. Souvent, elle génère plusieurs idées et permet d'émettre des hypothèses et de concevoir des théories provisoires. Elle permet également de mettre au point des techniques et d'explorer des avenues possibles pour d'autres recherches.	Leçons 2, 3, 4
	Démarche de construction d'opinion Lorsqu'il est appelé à construire son opinion et à construire une argumentation relative à une problématique scientifique ou technologique, l'élève doit prendre conscience de son engagement personnel, de ses croyances et de ses valeurs. Il importe donc qu'il réalise comment l'acquisition et l'utilisation de connaissances (disciplinaires, épistémologiques et contextuelles) et d'habiletés générales peuvent contribuer à la construction d'une opinion éclairée. Comme d'autres démarches, celle-ci fait appel à l'interprétation des informations, à leur mise en relation, à la reconnaissance des idées préconçues et des présupposés, à des modes de raisonnement analogique et à la prise en compte de faits apparemment contradictoires. Elle favorise la construction d'une argumentation solide et la justification d'une conclusion. En y faisant appel, l'élève devrait prendre conscience du fait que ses croyances et ses valeurs peuvent influencer son jugement, que la recherche de plusieurs sources d'information est déterminante, que la contradiction entre plusieurs sources d'information est fréquente et mérite d'être interprétée, et que le choix d'une solution peut dépendre de plusieurs facteurs.	Leçons 4, 5, 6
Stratégies Certaines stratégies, mobilisées et utilisées dans le contexte de la science et de la technologie, soutiennent le développement des trois compétences de la discipline.	**Stratégies d'exploration** ■ Inventorier le plus grand nombre possible d'informations scientifiques, technologiques et contextuelles éventuellement utiles pour cerner un problème ou prévoir des tendances ■ Évoquer des problèmes similaires déjà résolus ■ Généraliser à partir de plusieurs cas particuliers structurellement semblables ■ Anticiper les résultats d'une démarche ■ Élaborer divers scénarios possibles ■ Explorer diverses pistes de solution ■ Envisager divers points de vue liés aux problématiques scientifiques ou technologiques	Leçons 2, 3

	Stratégies d'analyse ■ Déterminer les contraintes et les éléments importants pour la résolution d'un problème ■ Diviser un problème complexe en sous-problèmes plus simples ■ Faire appel à divers modes de raisonnement (ex. inférer, induire, déduire, comparer, classifier, sérier) pour traiter les informations ■ Raisonner par analogie pour traiter des informations et adapter des connaissances scientifiques et technologiques ■ Sélectionner des critères pertinents qui permettent de se situer au regard d'une problématique scientifique ou technologique	Leçons 1, 2, 4, 5, 6
Attitudes L'adoption de diverses attitudes facilite l'engagement de l'élève dans les démarches utilisées et sa responsabilisation par rapport à lui-même et à la société. Les attitudes constituent ainsi un facteur important dans le développement des compétences.	**Attitudes Intellectuelle** ■ Curiosité ■ Sens de l'initiative ■ Goût du risque intellectuel ■ Intérêt pour la confrontation des idées ■ Considération de solutions originales ■ Rigueur intellectuelle ■ Objectivité ■ Sens du travail méthodique ■ Souci d'une langue juste et précise	Toutes les Leçons
	Attitudes Comportementales ■ Discipline personnelle ■ Autonomie ■ Persévérance ■ Sens du travail soigné ■ Sens des responsabilités ■ Sens de l'effort ■ Coopération efficace ■ Souci de la santé et de la sécurité ■ Respect de la vie et de l'environnement ■ Écoute ■ Respect de soi et des autres ■ Esprit d'équipe ■ Solidarité internationale à l'égard des grands problèmes de l'heure	Toutes les Leçons

Techniques Souvent incontournables, les techniques renvoient à des procédés méthodiques qui balisent la mise en pratique de connaissances théoriques. Elles sont réparties en deux grandes catégories, selon qu'elles sont propres à la technologie ou à la science.	**Tchniques: Langage Graphique** ■ Utilisation d'échelles ■ Représentation graphique à l'aide d'instruments (projection orthogonale à vues multiples, isométrie, perspective) ■ Schématisation	Leçon 5
	Techniques: Science ■ Utilisation sécuritaire du matériel de laboratoire ■ Utilisation d'instruments de mesure ■ Utilisation d'instruments d'observation ■ Préparation de solutions ■ Collecte d'échantillons	Leçons 2, 3

Source : Ministère de l'Éducation du Québec (2009). Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, deuxième cycle. Québec: Gouvernement du Québec.
Ministère de l'Éducation du Québec (2009). Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, deuxième cycle. Science et environnement - Science et technologie de l'environnement. Québec: Gouvernement du Québec.

Les stratégies d'enseignement proposées dans les leçons vous appuient afin de répondre aux normes du programme de sciences du Québec des élèves du deuxième cycle du secondaire.

Ce module aide les professeurs de sciences à planifier le programme de sciences en fournissant des objectifs à court terme destinés aux élèves. Il comprend aussi des outils de planification pour enseigner ce module, tels que le tableau 1, *Contenu scientifique et cheminement théorique* (page 11) et le tableau 5, *Calendrier proposé* (page 34). Vous pouvez utiliser ce module pour mettre à jour votre programme, en fonction des champs d'intérêt des élèves. Les leçons visent un apprentissage actif, collaboratif et axé sur la recherche, vous appuient dans le développement de la compréhension des élèves et favorisent l'apparition d'une nouvelle communauté d'apprenants scientifiques.

La structure des leçons vous permet d'orienter et de faciliter l'apprentissage. Toutes les activités encouragent et soutiennent la recherche des élèves, favorisent des débats parmi eux et les mettent au défi d'accepter et de partager la responsabilité de leur apprentissage. L'utilisation du modèle éducationnel « 5E » de BSCS, combiné à un apprentissage actif et collaboratif, vous permet de répondre efficacement aux élèves provenant de divers milieux et ayant des styles d'apprentissage variés. Le module est entièrement annoté et comporte des suggestions sur la façon d'encourager et de modéliser les compétences en recherche scientifique. Il favorise également la curiosité ainsi qu'une ouverture face au scepticisme et aux nouvelles idées et aux nouvelles données.

De quelle façon le modèle éducationnel « 5E » de BSCS peut-il promouvoir un apprentissage actif, collaboratif et fondé sur la recherche scientifique?

Il est difficile de réaliser des apprentissages en demeurant passif, d'ailleurs, les leçons de ce module favorisent plutôt un apprentissage actif. Les élèves ne font pas que lire et écouter. Ils développent des compétences, analysent et évaluent leurs observations, font des expériences et discutent avec leurs pairs de ce qu'ils ont compris. Les élèves travaillent en collaboration afin de résoudre des problèmes et de planifier leurs recherches. Beaucoup d'élèves travaillent mieux en compagnie d'autres élèves dans une atmosphère de collaboration, plutôt que de travailler seul dans une atmosphère compétitive. En mode actif, l'apprentissage collaboratif est orienté vers le travail scientifique, ce qui permet aux élèves de faire leurs propres découvertes. Ils posent des questions, observent, analysent, expliquent, tirent des conclusions et posent de nouvelles questions. Ces apprentissages fondés sur des expériences exigent que les élèves réalisent des essais directs et d'autres essais pour lesquels les élèves doivent trouver des explications grâce à leur esprit critique et leur pensée logique.

L'approche selon laquelle les élèves sont des penseurs actifs qui bâtissent leur propre compréhension à partir d'interactions avec des phénomènes, l'environnement et d'autres individus se fonde sur la théorie du *constructivisme*. L'approche constructiviste reconnaît que les élèves ont besoin d'un moment pour :

- exprimer leur pensée actuelle;
- interagir avec des objets, des organismes, des substances et du matériel afin de développer un esprit critique fondé sur les expériences réalisées;
- noter par écrit leurs opinions, les exprimer et les comparer à celle de leurs pairs;
- établir des liens entre leurs expériences d'apprentissage et le monde actuel.

Ce module fournit également une structure intégrée visant à favoriser une approche constructiviste dans votre classe : le modèle éducationnel 5E de BSCS.[8] Le modèle 5E propose une série ordonnée d'expériences d'apprentissage qui permettent aux élèves de développer, éventuellement, une compréhension d'un concept. Ce modèle transporte les élèves à travers cinq phases d'apprentissage dont les mots-clés commencent par la lettre E : entreprendre, explorer, expliquer, élaborer et évaluer. Les paragraphes suivants démontrent de quelle façon les phases commençant par la lettre E sont mises en œuvre tout au long des leçons de ce module.

Entreprendre

Les élèves abordent les situations d'apprentissage en ayant des connaissances préalables. Ces connaissances déjà acquises peuvent ou non être les mêmes qui sont présentées dans ce module. La leçon de la phase « Entreprendre » donne l'occasion aux enseignants de déterminer ce que les élèves savent déjà, ou croient déjà savoir, à propos des sujets et concepts abordés. La leçon 1, *À la recherche de nutriments* de la phase « Entreprendre » de ce module a été conçue pour :

- piquer la curiosité des élèves et susciter leur intérêt;
- évaluer la compréhension actuelle des élèves au sujet des besoins nutritionnels;
- inviter les élèves à se poser des questions au sujet des éléments essentiels;
- encourager les élèves à comparer leurs idées avec celles de leurs pairs;
- permettre aux enseignants d'évaluer ce que les élèves comprennent ou non à propos des sujets abordés dans la leçon.

Explorer

Dans la phase d'exploration du module (la leçon 2, ***Les propriétés des sols***), les élèves étudient la composition des sols. Ils réalisent des expérimentations conçues pour fournir un ensemble commun d'expériences avec lesquelles ils pourront commencer à développer une compréhension. Les élèves :

- utilisent le matériel et partagent leurs idées avec la classe et lors des discussions en petits groupes;
- acquièrent un ensemble commun d'expériences afin de comparer leurs résultats et leurs idées avec ceux de leurs pairs;
- observent, décrivent, notent, comparent et partagent leurs idées et expériences;
- expriment leur compréhension au sujet de questions vérifiables et de la recherche scientifique.

Expliquer

Les leçons de la phase « Expliquer » (la leçon 3, *Les interactions plantes-sols* et la leçon 5, *Les nutriments végétaux et l'environnement*) donnent aux élèves l'occasion d'établir un lien entre leurs expériences antérieures et leur apprentissage actuel et de se faire une idée des principaux concepts abordés dans ce module. Cette phase permet également de leur apprendre la terminologie scientifique et de leur fournir des renseignements qui pourraient faciliter la description des expériences antérieures des élèves. La leçon « Expliquer » encourage les élèves à :

- expliquer les concepts et leurs points de vue (dans leurs propres mots) sur la façon dont les plantes se procurent des nutriments complémentaires et sur les conséquences de l'utilisation accrue des engrais sur l'environnement;
- écouter les explications de leurs pairs et les comparer avec leurs propres explications;
- discuter activement avec d'autres élèves pour que chacun puisse exprimer ses opinions et débattre ses idées;
- revoir leurs idées;
- noter leurs idées et leur compréhension actuelle;
- utiliser les étiquettes, la terminologie et le langage officiel;
- comparer leur opinion actuelle avec la précédente.

Élaborer

Dans les leçons de la phase « Élaborer », les élèves approfondissent des concepts appris et des expériences réalisées précédemment ou les appliquent à de nouvelles situations. Dans les leçons de la phase « Élaborer » de ce module (la leçon 4, *Les carences en nutriments des plantes* et la leçon 5, *Les nutriments végétaux et l'environnement*), les élèves :

- établissent des liens conceptuels entre les nouvelles expériences et les expériences antérieures, et établissent un lien entre les différents aspects de leurs recherches sur la plante et les sols et leurs concepts scientifiques;
- établissent des liens entre les différentes notions, résolvent des problèmes et appliquent leur compréhension à une nouvelle situation;
- utilisent des termes et des descriptions scientifiques;
- tirent des conclusions raisonnables à partir des observations et des données;
- approfondissent leur compréhension des concepts et des processus;
- expliquent ce qu'ils ont compris à leurs pairs.

Évaluer

La phase « Évaluer » est la phase finale du modèle éducationnel, mais elle ne fournit qu'un coup d'œil sur ce que les élèves comprennent et sur tous les progrès qu'ils ont réalisés. En réalité, l'évaluation de la compréhension conceptuelle des élèves et de leur aptitude à utiliser leurs compétences commence à la phase « Entreprendre » et continue dans chacune des autres phases du modèle éducationnel. Lorsque la phase « Évaluer » est combinée aux travaux écrits et aux travaux pratiques des élèves, elle fournit une évaluation sommative du degré de connaissances des élèves et de ce qu'ils sont capables de réaliser.

La phase « Évaluer » du module (la leçon 6, *Nourrir la planète au 21e siècle)* donne aux élèves l'occasion de :

- démontrer ce qu'ils comprennent sur les plantes et les engrais et comment ils peuvent appliquer leurs connaissances en émettant des recommandations sur l'approvisionnement en nourriture pour la population mondiale en pleine croissance;
- justifier leurs recommandations à l'aide d'arguments;
- partager leur point de vue avec leurs camarades de classe;
- constater et évaluer leurs propres progrès en comparant leurs connaissances préalables avec leurs connaissances actuelles;
- poser de questions qui leur permettent de pousser plus loin leur cheminement.

Pour revoir plus en détail le lien qui existe entre le modèle éducationnel 5E et les concepts présentés dans ce module, consultez le tableau 1 (page 11).

Lorsque vous utilisez le modèle éducationnel 5E, vous vous livrez à des pratiques bien différentes des pratiques d'enseignement traditionnelles. Par le fait même, les élèves apprennent par des moyens différents de ceux utilisés dans une salle de classe traditionnelle. Les tableaux suivants dressent la liste des différences : le tableau 3, *Tâches de l'enseignant* et le tableau 4, *Tâches des élèves.*

Tableau 3.

Tâches de l'enseignant

Phase	Pratiques conformes au modèle éducationnel 5E	Pratiques non conformes au modèle éducationnel 5E
Entreprendre	■ Piquer la curiosité des élèves et susciter leur intérêt ■ Évaluer la compréhension actuelle des élèves (avant d'acquérir des connaissances) d'un concept ou d'un sujet ■ Inviter les élèves à partager leur point de vue Inviter les élèves à se questionner	■ Fournir des mots de vocabulaire ■ Expliquer les concepts ■ Donner des définitions et des réponses ■ Fournir les conclusions ■ Déprécier les idées et les questions des élèves
Explorer	■ Encourager les interactions entre élèves ■ Observer et écouter les élèves en interaction ■ Poser des questions d'approfondissement pour aider les élèves à donner un sens à leurs expériences ■ Accorder du temps aux élèves pour décortiquer les problèmes	■ Fournir des réponses ■ Cheminer trop rapidement pour que les élèves puissent donner un sens à leurs expériences ■ Fournir les conclusions ■ Dire aux élèves qu'ils ont tort ■ Donner des informations et des faits qui leur permettent de résoudre les problèmes ■ Donner la solution aux élèves étape par étape
Expliquer	■ Encourager les élèves à utiliser leurs expériences et leurs données communes provenant des phases « Entreprendre » et « Explorer » pour trouver des explications ■ Poser des questions qui permettent aux élèves d'exprimer leur compréhension et d'expliquer un concept ■ Demander aux élèves de justifier leurs explications à l'aide d'arguments ■ Accorder du temps aux élèves pour leur permettre de comparer leurs idées avec celles de leurs camarades, et si nécessaire modifier leur opinion ■ Fournir la terminologie et d'autres explications, après que les élèves ont exprimé leur point de vue	■ Ne pas demander aux élèves de fournir des explications ■ Ignorer les données et les informations recueillies par les élèves au cours des leçons précédentes ■ Rejeter les idées des élèves ■ Accepter des explications qui ne sont pas appuyées par des observations et des faits ■ Présenter des concepts et développer des compétences sans lien avec le sujet

Élaborer	■ Attirer l'attention des élèves sur les liens conceptuels entre leurs nouvelles expériences et celles réalisées antérieurement ■ Encourager les élèves à utiliser ce qu'ils ont appris pour expliquer un nouveau phénomène ou une nouvelle opinion ■ Inciter les élèves à utiliser des descriptions et des termes appris précédemment ■ Poser des questions qui permettront aux élèves de tirer des conclusions raisonnables à partir des observations et des données	■ Ne pas aider les élèves à établir un lien entre leurs nouvelles expériences et celles réalisées antérieurement ■ Fournir des réponses définitives ■ Dire aux élèves qu'ils ont tort ■ Donner la solution aux élèves étape par étape
Évaluer	■ Observer et prendre des notes lorsque les élèves font la démonstration de leur compréhension des concepts et de leurs compétences ■ Accorder du temps aux élèves pour leur permettre de comparer leurs idées avec celles de leurs pairs, et si nécessaire modifier leur opinion ■ Poser des questions aux élèves pour évaluer leur compréhension ■ Inciter les élèves à évaluer leurs propres progrès	■ Procéder à une évaluation sur les mots de vocabulaire, les termes et les faits isolés ■ Présenter de nouvelles idées ou de nouveaux concepts ■ Créer de l'ambiguïté ■ Favoriser des discussions sans fin et sans lien avec le concept ou la compétence

Tableau 4.

Tâches des élèves

Phase	Pratiques conformes au modèle éducationnel 5E	Pratiques non conformes au modèle éducationnel 5E
Entreprendre	■ Développer de l'intérêt et de la curiosité envers le concept ou le sujet ■ Exprimer sa compréhension actuelle d'un concept ou d'un sujet ■ Poser des questions telles que « Qu'est-ce que j'y connais déjà? », « Qu'est-ce que je veux découvrir? » et « Comment puis-je le découvrir? »	■ Demander à obtenir « LA » bonne réponse ■ Donner la « bonne » réponse ■ Mettre l'accent sur les réponses et les explications ■ Chercher à conclure
Explorer	■ Examiner le matériel et les idées ■ Réaliser des recherches dans lesquelles il faut observer, décrire et noter des informations ■ Essayer différentes façons de résoudre un problème ou de répondre à une question ■ Réaliser un ensemble d'expériences afin de comparer les résultats et les idées ■ Comparer les idées avec celles de leurs pairs	■ Laisser les autres réfléchir et explorer (implication passive) ■ Travailler silencieusement sans interagir avec les autres élèves (approprié seulement au moment d'évaluer leurs opinions et impressions) ■ S'arrêter à une seule solution ■ Demander la conclusion ou chercher à conclure
Expliquer	■ Expliquer les concepts et idées dans leurs propres mots ■ Fonder leurs explications sur des observations réalisées lors d'expériences précédentes ■ Noter leur point de vue et leur compréhension actuelle ■ Revoir leur point de vue et le modifier si nécessaire ■ Exprimer leur point de vue en utilisant un langage scientifique approprié ■ Comparer leur point de vue avec les connaissances et la compréhension des scientifiques	■ Proposer des explications sans réflexion et sans lien avec les expériences précédentes ■ Mentionner des expériences et des exemples non pertinents ■ Accepter des explications sans justification ■ Ignorer ou rejeter d'autres explications plausibles ■ Proposer des explications sans arguments à l'appui

Élaborer	■ Concentrer leur attention sur les liens conceptuels entre les nouvelles expériences et celles réalisées antérieurement ■ Utiliser ce qu'ils ont appris pour expliquer un nouveau phénomène ou un nouveau point de vue ■ Utiliser des termes et des descriptions scientifiques présentés précédemment ■ Répondre aux questions qui les aident à tirer des conclusions à partir des observations et des données	■ Ignorer des informations et des arguments existants ■ Tirer des conclusions sans réflexion ■ Utiliser une terminologie non appropriée et sans la comprendre
Évaluer	■ Établir des liens conceptuels entre leurs nouvelles expériences et celles réalisées antérieurement ■ Utiliser ce qu'ils ont appris afin d'expliquer un nouvel objet, un nouveau phénomène, un nouvel organisme ou un nouveau point de vue ■ Utiliser des descriptions et des termes scientifiques ■ Tirer des conclusions raisonnables à partir des observations et des données ■ Exprimer leur compréhension aux autres élèves ■ Faire la démonstration de ce qu'ils comprennent au sujet des concepts et de la façon de mettre en œuvre une compétence ■ Comparer leur point de vue actuel à ceux des autres et si nécessaire, modifier leur point de vue ■ Évaluer leurs propres progrès en comparant leur compréhension actuelle avec celle d'avant ■ Poser de nouvelles questions qui permettront d'étudier plus en profondeur un concept ou un sujet	■ Ne pas tenir compte des arguments ou des explications acceptées précédemment pour tirer leurs conclusions ■ Ne répondre que par « oui » ou par « non » ou ne donner que des définitions ou des explications apprises par coeur ■ Ne pas donner d'explications satisfaisantes dans leurs propres mots ■ Présenter des sujets nouveaux et non pertinents

De quelle façon le module permet-il de faire des évaluations continues?

Puisque les enseignants utilisent ce module d'une multitude de façons et à différentes étapes de leur programme de sciences, le mode d'évaluation des apprentissages des élèves le plus adéquat consiste à les évaluer de façon non officielle à différentes étapes des leçons, plutôt que de les évaluer qu'une seule fois à la fin du module. En conséquence, vous trouverez des éléments d'évaluation précis dans les leçons du module. Ces évaluations intégrées comportent l'une ou plusieurs des stratégies suivantes :

- Des activités fondées sur le rendement, telles que l'interprétation de graphiques ou la participation à une discussion sur les risques et les avantages.
- Des présentations orales devant la classe, par exemple, sur les résultats de leurs expériences.
- Des travaux écrits, par exemple de répondre à des questions ou de rédiger un texte au sujet des démonstrations.

Ces stratégies vous permettent d'évaluer plusieurs aspects du processus d'apprentissage, tels que les connaissances antérieures des élèves, leur compréhension actuelle, leurs aptitudes à résoudre des problèmes, leur pensée critique, leur niveau de compréhension des nouvelles informations, leurs aptitudes à communiquer et leurs aptitudes à résumer leur point de vue et à appliquer leurs nouvelles connaissances à une nouvelle situation.

Comment les enseignants peuvent-ils promouvoir la sécurité dans la classe de sciences?

Même les démonstrations et les recherches les plus simples peuvent comporter des risques, sauf si les enseignants et les élèves connaissent et respectent les mesures de sécurité. Les enseignants doivent fournir aux élèves des directives sur leur comportement en classe, afin d'assurer leur sécurité. De simples affiches sur la sécurité en classe ne suffisent pas. Les enseignants doivent aussi superviser adéquatement le travail des élèves et les prévenir si l'expérience scientifique qu'ils s'apprêtent à réaliser comporte un danger potentiel. En maintenant le matériel en bon état, les enseignants assurent un environnement sécuritaire pour les élèves.

Il vous est possible de mettre en œuvre et de maintenir un programme de sécurité en suivant ces quelques conseils :

- Fournir des lunettes de sécurité aux élèves, aux enseignants et aux visiteurs. Exiger que tous les participants portent des lunettes réglementaires dans les situations où il pourrait y avoir des éclaboussures ou des déversements. Les enseignants doivent également porter des lunettes de sécurité dans de telles situations.
- Connaître et suivre les règles et politiques de sécurité municipales et provinciales. S'assurer de bien expliquer aux élèves les règles de sécurité à suivre en classe.

- En début d'année scolaire, expliquer aux élèves les conséquences que subiront les élèves qui se comportent de façon non sécuritaire. S'assurer que tous les élèves comprennent ces conséquences.
- Sévir en cas de violation d'une règle de sécurité, si mineure soit-elle. Si une règle est enfreinte, prendre les mesures nécessaires afin de s'assurer que cette violation ne se reproduise pas.
- Donner l'exemple en observant vous-même les règles de sécurité. Cela comprend le port des lunettes de sécurité lors des expériences pour lesquelles le port des lunettes est obligatoire chez les élèves.
- Connaître et suivre les règles en matière d'élimination des déchets.
- Se tenir au courant des élèves ayant des allergies ou d'autres troubles médicaux qui pourraient limiter leur participation à certaines activités. Consulter l'infirmière ou le responsable de l'école.
- Anticiper les problèmes. Lors de la planification des démonstrations des enseignants ou des recherches des élèves, évaluer les dangers possibles et les problèmes en matière de sécurité. Être conscient de ce qui pourrait mal tourner et savoir ce qu'il peut être fait pour éviter une catastrophe. Avant chaque activité, informer verbalement les élèves des dangers possibles et donner des directives de sécurité.
- Superviser les élèves en tout temps au cours des activités pratiques.
- Accorder suffisamment de temps aux élèves pour préparer le matériel, réaliser leur expérience, nettoyer adéquatement et ranger le matériel.
- Ne jamais présumer que les élèves connaissent les règles et les pratiques de sécurité ou qu'ils s'en souviennent depuis le dernier cours.

De quelle façon peut-on traiter les sujets controversés en classe?

Les enseignants croient parfois que les discussions au sujet des valeurs humaines sont inappropriées en cours de sciences ou qu'elle porte atteinte à l'apprentissage des « véritables » sciences. Toutefois, les leçons de ce module sont fondées sur la conviction qu'il y a beaucoup à gagner en faisant l'analyse de questions touchant les sciences, les technologies et la société. La société s'attend à ce que tous les citoyens participent au processus de démocratie, donc notre système d'éducation doit donner l'occasion aux élèves d'apprendre à traiter de questions litigieuses avec civilité, objectivité et équité. De même, les élèves doivent apprendre que la science est étroitement liée avec la vie, et ce, de plusieurs façons.

Dans ce module, les élèves ont souvent l'occasion de discuter, d'interpréter et d'évaluer la science fondamentale et les questions de santé, en fonction de leurs propres valeurs et des principes éthiques. Comme les élèves discutent de sujets qui parfois leur tiennent à coeur, certaines des discussions pourraient soulever des controverses. Le niveau de controverse dépend de plusieurs facteurs tels que le statut socio-économique des élèves, leurs perspectives, leurs valeurs et leurs croyances religieuses. De plus, leur langage et leur attitude influencent les arguments présentés et la qualité de l'échange entre les élèves.

Les directives suivantes peuvent vous aider à maintenir un équilibre entre les informations factuelles et les sentiments au cours des discussions :

- Demeurer neutre. La neutralité est probablement la seule caractéristique importante d'un bon animateur de discussion.
- Encourager les élèves à rechercher le plus d'information possible à propos du sujet discuté.
- Reconnaître que certains enjeux ne sont pas dans le cadre du programme et offrir aux étudiants l'opportunité d'explorer d'autres aspects de la question.
- Maintenir une discussion pertinente et sans lenteur inutile en posant des questions, en soulevant des problèmes ou en proposant des situations hypothétiques. Encourager les élèves à contribuer à la discussion sans toutefois forcer les élèves hésitants à participer à la discussion.
- Insister sur le fait que tous doivent s'ouvrir aux points de vus différents des autres personnes.
- Utiliser des questions impartiales afin d'aider les élèves à évaluer d'un œil critique les points de vues présentés.
- Permettre aux élèves de discuter de ce qu'ils ressentent et de donner leur opinion.
- Ne pas chercher à obtenir un consensus sur tous les sujets abordés. Le fait de discuter de sujets divers peut favoriser l'expression de points de vue divergents, mais il faut apprendre aux élèves à accepter les différences d'opinions.
- Accueillir toutes les interventions avec la même impartialité. Si un élève semble émettre un commentaire uniquement pour choquer les autres, consulter les autres élèves pour savoir s'ils trouvent ce commentaire inapproprié et inviter les élèves à répondre à ce commentaire.
- Créer une sensation de liberté dans la classe. Toutefois, rappeler aux élèves que ce privilège comporte aussi la responsabilité de parvenir à des résultats positifs.
- Insister pour qu'il n'y ait aucune hostilité dans la classe. Rappeler aux élèves qu'ils doivent donner leur opinion sur des points de vue et non sur les élèves qui ont présenté ces points de vue.
- Respecter le silence. Les discussions qui portent à réflexion prennent souvent plus de temps. Si l'enseignant brise le silence, les élèves le laisseront mener la discussion.
- À la fin de la discussion, demander aux élèves de résumer les différents points entendus. Respecter les élèves, indépendamment de leurs opinions sur toute question controversée.

Comment utiliser les leçons

Le cœur de ce module est composé de six leçons à faire en classe. Ces leçons vous aideront à présenter les notions à vos élèves. Pour revoir les concepts en détail, se reporter au tableau 1 (page 11).

Format des leçons

Lorsque vous consulterez les leçons, vous verrez que toutes contiennent des caractéristiques principales communes.

Coup d'œil vous procure un résumé pratique de la leçon.

- ***Aperçu*** vous procure un résumé des activités que vont réaliser les élèves.
- ***Principaux concepts*** fait état des idées principales transmises dans la leçon.
- ***Objectifs*** dresse la liste des connaissances ou aptitudes que les élèves devraient avoir acquises à la fin de la leçon.
- ***Notions additionnelles pour l'enseignant*** précise les parties de la section de référence qui se rapportent directement à la leçon. Cette documentation fournit le contenu scientifique qui sous-tend les concepts clés que contient la leçon. L'information fournie n'est *pas* destinée à former la base des exposés présentés aux élèves. Elle a été conçue pour améliorer votre compréhension du contenu, afin que vous puissiez animer plus facilement les discussions en classe, répondre aux questions des élèves et donner des exemples.

Au préalable fournit des directives pour la collecte et la préparation du matériel requis pour réaliser les activités de la leçon.

- ***Photocopies*** dresse la liste des photocopies et des documents transparents à préparer, en utilisant les originaux que vous trouverez à la fin de chaque leçon.
- ***Materiel*** dresse la liste de tout le matériel (autres que les photocopies) requis pour chacune des activités de la leçon.
- ***Préparatifs*** décrit ce que vous devez préparer avant chacune des leçons.

Marche à suivre décrit toutes les étapes de chaque activité de la leçon. Cela comprend les trucs, les réponses et les sujets de discussion. Dans la section ***Marche à suivre***, les annotations vous fournissent des informations supplémentaires.

Originaux documents à reproduire qui sont requis pour enseigner les activités que l'on trouve à la fin de chacune des leçons.

Calendrier du module

La chronologie qui suit présente le calendrier de travail optimal pour enseigner les leçons de ce module. Ce plan suppose que vous enseignerez les leçons quotidiennement. Si vous nécessitez plus de temps pour réaliser les activités ou pour tenir des discussions sur les sujets du module, modifiez le calendrier en conséquence.

Tableau 5.
Calendrier proposé

Calendrier	Activité
2 semaines à l'avance	Se procurer le matériel pour les leçons 2 et 3.
1 semaine à l'avance	Photocopier les originaux, préparer les documents transparents et réunir le matériel. Faire germer les graines pour la leçon 3.
Jour 1 Lundi	**Leçon 1** Activité 1 : *Les nutriments essentiels* Activité 2 : *Les sources de nutriments essentiels*
Jours 2 et 3 Mardi et mercredi	**Leçon 2** Activité 1 : *Les propriétés des sols*
Jour 4 Jeudi	**Leçon 3** Activité 1 : *De la terre aux racines* Activité 2 : *Des racines à la plante*
Jour 5 Vendredi	**Leçon 4** Activité 1 : *Nourrir les plantes* Activité 2 : *La lutte contre la faim*
Jour 6 Lundi	**Leçon 5** Activité 1 : *La grosse pomme* Activité 2 : *Utiliser les terres judicieusement* Activité 3 : *L'avenir des engrais*
Jour 7 Mardi	**Leçon 6** Activité 1 : *Nourrir la planète au 21e siècle*

Notions additionnelles pour l'enseignant

1.0 Introduction

Nous avons la chance de vivre dans une société où la nourriture abonde. La plupart d'entre nous tenons pour acquise toute cette nourriture. Si nous manifestons des inquiétudes par rapport à la nourriture, c'est surtout par rapport aux valeurs nutritives ou à la nécessité de réduire le taux d'obésité. Plusieurs d'entre nous n'avons jamais visité une exploitation agricole, ni n'avons jamais tenté de comprendre les techniques utilisées par les agriculteurs pour produire notre nourriture. L'une des réussites de l'agriculture moderne consiste à nourrir un grand nombre de personnes grâce aux efforts de seulement quelques producteurs agricoles. Cette situation permet à la grande majorité de la population de se livrer à plusieurs activités sans avoir à se soucier de produire des aliments pour nourrir leur famille.

Bien sûr, ça n'a pas toujours été le cas. Au cours de l'histoire de l'humanité, la population mondiale a presque toujours augmenté de façon constante. Toutefois, au cours des 100 dernières années, la population mondiale a augmenté à un point tel que l'utilisation des méthodes agricoles les plus efficaces est non seulement souhaitable, mais est devenue essentielle pour éviter la famine mondiale. En 1950, la population mondiale atteignait 3 milliards de personnes. Ce chiffre a doublé en seulement 50 ans. Cette augmentation rapide a entraîné l'utilisation de méthodes agricoles telles qu'une utilisation accrue des engrais commerciaux pour combler les carences des sols. Au cours de ce qu'on appelle la « révolution verte », le rendement des cultures a augmenté suffisamment pour combler les demandes alimentaires. En 1950, 790 millions d'hectares de terres agricoles ont été utilisés pour produire 628 millions de tonnes de céréales. En 1992, essentiellement la même quantité d'hectares a permis de produire 1,7 milliard de tonnes de céréales.[10] Non seulement la révolution verte a-t-elle permis de nourrir la population croissante, mais elle a aussi permis de limiter la quantité de terres agricoles nécessaires pour augmenter le rendement agricole. Si l'Inde, très populeuse, n'avait pas utilisé des méthodes agricoles à haut rendement, mises au point pendant la révolution verte, elle aurait dû exploiter des terres supplémentaires (soit d'une dimension d'environ les deux tiers de la Saskatchewan) pour produire la même quantité de céréales.

Cependant, les percées issues de la révolution verte ont presque atteint leur plein potentiel d'augmentation du rendement des cultures. De plus, l'augmentation toujours constante de la population mondiale ne semble pas prête de s'arrêter. On estime que d'ici à 2050, la population mondiale aura atteint de 8 à 9 milliards de personnes.[29] Comment réussirons-nous à nourrir tout ce monde? La plupart des terres propices à l'agriculture sont déjà cultivées. Nous n'avons d'autre choix que d'explorer d'autres moyens d'accroître le rendement des cultures et de maintenir la qualité des sols.

Le défi auquel nous ferons face à l'avenir est complexe. Nous devons nourrir une population qui croît de 80 millions de personnes par année en utilisant la même quantité de terres agricoles. Il est clair que les anciennes pratiques agricoles ne seront pas en mesure de suffire à la demande alimentaire à laquelle nous aurons à faire face. Notre réponse face à ce défi nous poussera à prendre des décisions difficiles notamment à proposde l'utilisation des terres, des engrais commerciaux et organiques, des pesticides, des semences génétiquement modifiées, et des questions sociales qui en découlent qui vont au-delà de la portée de ce module. En tant que société, nous aurons à décider de quelle façon l'agriculture peut, de manière économique, nourrir la population sans cesse croissante, tout en préservant l'environnement.

Ces questions prendront de plus en plus d'importance au cours des prochaines décennies. Lorsque les jeunes d'aujourd'hui deviendront des adultes et feront leur entrée sur le marché du travail, ils seront invités à prendre des décisions concernant l'exploitation des ressources naturelles telles que les terres agricoles. Nous espérons qu'ils prendront des décisions rationnelles sur l'utilisation de la technologie qui bénificieront la société.

L'objectif du module *Nourrir la planète au 21e siècle* consiste à préparer les élèves à relever les défis de demain. Les leçons ont été conçues pour améliorer leur compréhension de base de la biologie végétale et du processus de recherche scientifique. Elles permettent de développer leur esprit critique dans un contexte bien réel dans lequel il faut nourrir une population croissante. Le module met l'accent sur les nutriments végétaux : découvrir ce que c'est, pourquoi ils sont importants, d'où ils proviennent, quels sont leurs effets sur l'environnement et comment les gérer.

2.0 Les plantes et leurs éléments essentiels

Tous les organismes doivent puiser dans l'environnement pour survivre. Il existe 92 éléments présents naturellement dans l'environnement. Seule une minorité d'entre eux sont nécessaires aux organismes vivants. Par exemple, les humains ont besoin de 21 éléments différents pour demeurer en bonne santé.[22] Presque la totalité de notre masse corporelle est composée de six de ces éléments : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le calcium. Tels sont les éléments nécessaires pour constituer les hydrates de carbone, les acides nucléiques, les protéines et les autres molécules qui composent nos cellules et qui sont responsables des processus chimiques de notre corps. D'autres éléments indispensables à notre santé sont requis en très petites quantités. Souvent, de tels éléments sont des cofacteurs dont ont besoin les enzymes pour catalyser des réactions chimiques particulières. Peu importe si les éléments sont requis en grande ou en petite quantité, ils doivent provenir de l'environnement. Aussi, ils doivent non seulement provenir de l'environnement, mais doivent également être disponibles sous une forme chimique assimilable par notre corps.

Il n'est pas surprenant de constater que les plantes nous ressemblent en ce sens. De même que chez les humains, elles doivent produire des milliers de réactions chimiques différentes dont bon nombre sont similaires à celles des humains. Des scientifiques ont identifié 17 éléments qu'ils ont décrits comme des éléments essentiels (voir le tableau 6).[2] Un élément est considéré comme essentiel à la plante si les conditions suivantes sont respectées :

- L'élément est essentiel à la plante pour accomplir son cycle de vie.
- L'élément ne peut être remplacé par un autre.
- L'élément remplit une fonction biologique précise.[1]
- L'élément est essentiel pour un grand nombre d'espèces végétales différentes.

Trois éléments essentiels (le carbone, l'hydrogène et l'oxygène) sont classés comme des nutriments non minéraux, car on les trouve dans l'air et dans l'eau. Trois autres éléments (l'azote, le phosphore et le potassium) sont classés comme des macroéléments, car les plantes en ont besoin en quantités relativement importantes. Ces six éléments jouent des rôles importants, un peu comme des composantes de base des biomolécules de cellule, par exemple des protéines, des acides nucléiques et des glucides. Trois autres éléments (le calcium, le soufre et le magnésium) sont considérés comme des éléments secondaires, car ils soutiennent les processus biochimiques qui se produisent dans les cellules. Le reste des éléments essentiels sont des oligo-éléments, car ils ne sont nécessaires qu'en petites quantités. Il est important de noter que les oligo-éléments sont aussi essentiels pour les plantes que les macroéléments.

La grande majorité des éléments essentiels qu'absorbent les plantes proviennent de l'eau et du sol. La plupart du temps, les éléments essentiels sont absorbés comme ion métallique chargé positivement ou comme anion chargé négativement. Fait intéressant, en ce qui concerne l'azote, bien que l'air est composé d'environ 80 pour cent d'azote, les plantes ne peuvent assimiler l'azote gazeux (N_2). Elles doivent donc se procurer de l'azote sous forme d'ammonium (NH_4^+) ou de nitrate (NO_3^-) dans le sol. Ces formes ioniques de l'azote proviennent de la décomposition de matières organiques dans le sol ou par le biais d'un processus appelé fixation de l'azote par les microbes du sol. Certaines cultures de plantes (les légumineuses telles que les pois, les haricots, les arachides et le soja) vivent en contact étroit avec des bactéries fixatrices d'azote qui se trouvent dans leurs racines et qui convertissent le gaz N_2 en une forme assimilable par les plantes (par exemple de l'ammonium NH_4^-). Ces cultures obtiennent de façon continue une source d'azote, donc elles n'ont pas besoin d'engrais contenant de l'azote.

Tableau 6.
Nutriments essentiels pour les plantes

Élément	Symbole	Classe	Forme chimique assimilée par la plante
Hydrogène	H	Nutriment non minéral	H_2O
Oxygène	O	Nutriment non minéral	O_2 et CO_2
Carbone	C	Nutriment non minéral	CO_2
Azote	N	Macronutriments	NH_4^+ et NO_3^-
Phosphore	P	Macronutriments	$H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}
Potassium	K	Macronutriments	K^+
Calcium	Ca	Élément secondaire	Ca^{2+}
Magnésium	Mg	Élément secondaire	Mg^{2+}
Soufre	S	Élément secondaire	SO_4^{2-}
Bore	B	Oligo-élément	$B(OH)_3$
Chlore	Cl	Oligo-élément	Cl^-
Cuivre	Cu	Oligo-élément	Cu^{2+}
Fer	Fe	Oligo-élément	Fe^{2+} et Fe^{3+}
Manganèse	Mn	Oligo-élément	Mn^{2+}
Molybdène	Mo	Oligo-élément	MoO_4^{2-}
Nickel	Ni	Oligo-élément	Ni^{2+}
Zinc	Zn	Oligo-élément	Zn^{2+}

3.0 Les propriétés des sols

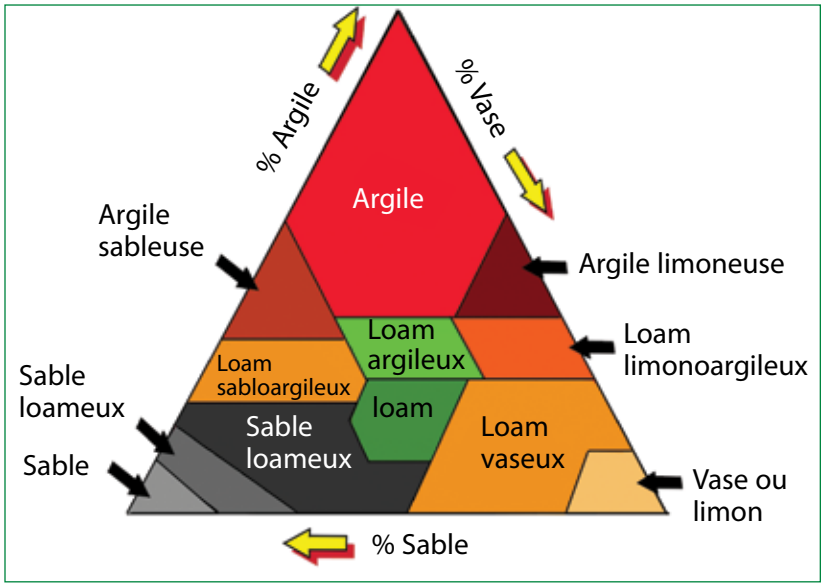
La société n'est pas très préoccupée par l'agriculture, ni par la « terre » que contiennent nos sols. En fait, le mot « terre » comporte une connotation négative. Elle nous rappelle la boue que nous devons nettoyer de nos bottes et de nos vêtements. En réalité, cette « terre » est essentielle à la survie de presque tous les organismes de notre planète. Notre planète est surtout composée de roche et le noyau est fait de fer et de nickel. Les plantes et les animaux, y compris les humains, n'occupent qu'une petite partie de la surface terrestre. Nous devons notre existence à une mince couche de terre qui se trouve entre nous et le centre rocheux de la planète, c'est le « sol ».

Les sols se forment grâce à l'altération des roches. Une exposition constante au vent et à la pluie fait craquer lentement la couche rocheuse en de fines particules. Il peut prendre des siècles pour produire une couche arable fertile. Alors que l'eau de pluie s'infiltre dans les fissures, les températures extrêmes font en sorte qu'elle gèle. Les roches prennent de l'expansion, se contractent et cassent. Cette érosion est facilitée par les organismes qui vivent sur la terre et dans la terre. Les sols sont composés de matières inorganiques provenant des roches, et de matières organiques provenant d'organismes morts ou vivants. Les deux types de matières ont leur importance pour soutenir la croissance des plantes. Des scientifiques croient que sans vie, les sols ne sont que poussière.

Les intempéries provoquent la création de matières inorganiques, soit des particules de différentes tailles. On entend par texture du sol les proportions relatives des particules de différentes tailles trouvées dans le sol. Les scientifiques classent les particules du sol en trois catégories. Les particules les plus petites, lesquelles mesurent moins de 0,002 millimètre, se nomment argile.[23] L'argile est très importante, car elle

contient les nutriments. Les particules d'argile forment des structures en plaques qui agissent tels des aimants, en retenant les nutriments jusqu'à ce qu'ils soient déplacés par un autre élément, absorbés par une racine, mangés par des microbes présents dans les sols ou absorbés chimiquement par le sol. Les particules suivantes, par ordre d'importance de taille, se nomment particules de limon. Leur taille varie de 0,002 millimètre à 0,06 millimètre. Les plus grandes particules forment le sable. Le diamètre des grains de sable varie de 0,06 millimètre à deux millimètres. Les proportions d'argile, de limon et de sable varient selon les sols. Les pédologues classent les différents types de sol à l'aide d'un triangle des textures. Chaque côté du triangle des textures représente la quantité de chacun des composants, soit l'argile, le limon ou le sable. Les quantités relatives de chacune des trois tailles de particules se rejoignent dans le triangle afin d'établir le type de sol auquel correspondent les proportions.

Figure 1.
Le triangle des textures sert à classer les types de sol.



La capacité des sols à absorber et à retenir l'eau est largement déterminée par les quantités relatives d'argile, de limon et de sable qu'ils contiennent. On entend par porosité les espaces dans le sol où peuvent circuler de l'air ou de l'eau. On entend par perméabilité la facilité avec laquelle l'eau pénètre dans le sol. Le tableau 7 dresse la liste des propriétés des différents diamètres de particules qui influencent la teneur en eau dans les sols. Les sols ayant les propriétés souhaitées pour pratiquer l'agriculture se nomment « loam ». Les sols loameux contiennent généralement environ 50 pour cent d'air, ce qui permet aux racines de « respirer » (c'est-à-dire d'obtenir de l'oxygène pour la respiration). La moitié solide des sols est composée d'environ 90 pour cent de minéraux et de 10 pour cent de matières organiques. Habituellement, les sols loameux ont des noms plus précis qui indiquent leur composition, telle que le limon argileux ou le loam limoneux.

Tableau 7.
Propriétés des particules du sol

Propriété	Argile	Limon	Sable
Porosité	Majoritairement des pores de petite taille	Majoritairement des pores de petite taille	Majoritairement des pores de grande taille
Perméabilité	Lente	Lente à modérée	Rapide
Capacité de rétention de l'eau	Élevée	Modérée	Limitée

Bien que la portion de matières organiques de la plupart des sols soit petite, si l'on compare avec la portion de matières minérales, elle joue un rôle important dans la croissance des plantes. Les matières organiques sont composées d'organismes vivants, de racines et de résidus végétaux et animaux. Un seul gramme de terre arable en bonne santé peut contenir 100 nématodes (petits vers ronds), 1 million de champignons et 1 milliard de bactéries.[31] Aussi, les vers de terre et une grande variété d'insectes sont présents, mais en plus petit nombre. Les matières organiques contiennent des quantités importantes de nutriments et de concert avec les racines, elles aident à :

- réduire l'érosion;
- augmenter l'infiltration d'eau et la rétention;
- agir comme tampon pH (pour maintenir un équilibre acido-basique);
- décomposer les matières organiques et libérer des nutriments;
- recycler le carbone, l'azote et d'autres nutriments;
- conserver les nutriments disponibles tels que les ions métalliques.

Le sol est en quelque sorte une « banque » de nutriments pour les plantes. Les sols doivent être réapprovisionnés pour continuer à favoriser la bonne croissance des plantes. Avant l'avènement de l'agriculture moderne, les agriculteurs comptaient uniquement sur le labour des sols pour permettre la décomposition des matières organiques existantes et ainsi libérer les nutriments du sol. Cette pratique est toujours utilisée dans de nombreux pays moins développés.

4.0 Les interactions plantes-sols

Les plantes utilisent leur système racinaire comme support structural, pour assurer sa stabilité et pour se nourrir. Si vous avez déjà été témoin d'un arbre renversé à cause de forts vents, vous savez sûrement pourquoi les arbres sont si stables. Même renversés, une grande partie de leur système racinaire demeure caché dans le sol. La fonction première du système racinaire est d'absorber l'eau et les nutriments du sol. Pour ce faire, le système racinaire progresse de façon continue au cours de la vie de la plante et croît tout au long de l'année, lorsque les conditions de croissance y sont favorables et que la partie supérieure de la plante n'épuise pas les réserves en nutriments et en eau. Les racines peuvent également servir à entreposer l'amidon et les sucres. Les carottes, les betteraves, les radis, les navets, les pommes de terre sont des exemples de racines d'entreposage.

La croissance des racines est similaire à la croissance des pousses, mais il existe d'importantes différences. En général, plus un système racinaire est étendu, plus ce dernier absorbera d'eau et de nutriments. Si vous examinez une racine à l'aide d'une loupe, vous verrez un grand nombre des poils absorbants blancs et délicats qui poussent sur la surface de la racine (voir la figure 2). Ce réseau de poils racinaires augmente de façon importante la surface de la racine ayant un contact avec l'eau et pouvant l'absorber. Un seul plant de seigle d'une hauteur de 60 centimètres peut avoir un système racinaire dont la longueur des racines mises bout à bout totalise 480 kilomètres. De plus, la surface de contact sol-racines totalise plus de 600 mètres carrés, soit deux fois la superficie d'un terrain de tennis![7]

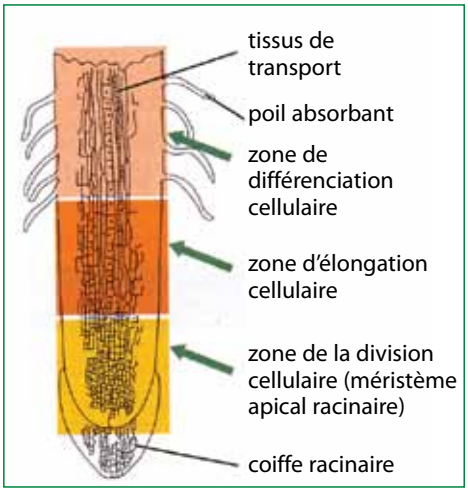
Figure 2.
Un semis de radis muni de poils absorbants.

La pointe d'un radis en croissance se nomme la coiffe (voir la figure 3). La coiffe produit une sécrétion visqueuse appelée mucilage qui permet de lubrifier la racine alors qu'elle se creuse un chemin dans le sol. Juste derrière la coiffe se trouve la zone de division cellulaire active, et derrière celle-ci se trouve une zone d'allongement cellulaire. Les cellules de la zone d'allongement croissent ou « gonflent » en absorbant de l'eau. Les cellules racinaires contiennent des sels et des sucres. Puisque les cellules racinaires contiennent plus de solutés que l'eau du sol, l'eau pénètre dans les cellules par diffusion. Les cellules s'allongent, ce qui oblige la racine à s'enfoncer davantage dans le sol. Derrière la zone d'allongement se trouve la zone de différenciation cellulaire. Les cellules de cette zone vont stimuler la croissance des cellules du système vasculaire, lequel fait monter l'eau jusqu'à la tige et fait descendre les sucres à partir des feuilles.

Les racines cessent de croître durant l'hiver, non pas parce qu'elles sont en dormance comme les bourgeons au sommet d'une plante, mais plutôt parce que la température est trop froide pour permettre une bonne croissance. Pour que les racines continuent de croître, elles doivent disposer de suffisamment d'humidité et d'une température adéquate. Beaucoup de gens croient à tort que les racines croissent parce qu'elles recherchent de l'eau, mais ce n'est pas le cas. Les racines ne peuvent pousser que si les conditions sont favorables à leur croissance. Donc, les racines poussent lorsqu'elles ont déjà de l'eau à leur disposition.

L'eau est absorbée par les poils absorbants. Elle transporte avec elle les produits chimiques, y compris les nutriments qui y sont dissous. La plupart des nutriments sont présents en concentration plus élevée dans les poils absorbants que dans l'eau du sol. Le transport actif permet de déplacer les nutriments plus en profondeur dans le système racinaire jusqu'à ce qu'ils atteignent les cellules du système vasculaire. L'importance du transport actif peut être démontrée en exposant les plantes à un produit chimique qui nuit à la respiration cellulaire. Sans un approvisionnement en molécules d'ATP qui fournit de l'énergie produite par la respiration, la circulation des nutriments est ralentie considérablement.

Figure 3.
Une section longitudinale d'une extrémité racinaire.



5.0 Le système vasculaire des plantes

Bien que les plantes ne disposent pas d'un système circulatoire comme celui des humains, elles doivent tout de même acheminer les matières d'une partie de l'organisme à une autre. La tige de la plante contient un système vasculaire qui relie les feuilles aux racines. Le système vasculaire de la plante est composé de xylèmes qui transportent l'eau des racines au reste de la plante et de phloèmes qui transportent les sucres produits dans les feuilles vers les parties de la plante non photosynthétiques (voir la figure 4). Le xylème est composé de cellules mortes qui forment de longs tubes vides. Certains tubes sont larges et d'autres étroits. Les parois cellulaires à l'intérieur des tubes comportent ou non une série de perforations qui permettent le passage de l'eau. Les cellules qui ont formé le xylème dressent d'épaisses parois cellulaires qui contiennent un polymère nommé lignine. La lignine donne de la force au xylème et l'empêche de s'effondrer sous la pression.

La capacité du xylème est vraiment incroyable. Dans le cas des grands arbres, l'eau doit être transportée des racines jusqu'aux feuilles, à une hauteur pouvant atteindre 100 mètres, contre la gravité. L'eau, dit-on, est acheminée par le xylème grâce à une théorie connue sous le nom de cohésion-tension. Selon cette théorie, l'eau peut être tirée vers le haut à condition que le diamètre du tube soit suffisamment petit et que le filet d'eau soit continu, c'est-à-dire, sans bulles d'air. Aussi, il faut que le tube soit constitué d'un matériau auquel les molécules d'eau peuvent adhérer. Dans chaque tube, les molécules d'eau sont attirées par les molécules d'eau adjacentes, et forment une chaîne ininterrompue. La plante perd de l'eau par évaporation à partir de ses feuilles grâce à un processus nommé transpiration. À mesure que l'eau s'évapore, une pression ou une tension négative tire l'eau vers le haut à partir du xylème. La transpiration est un processus qui permet le transport de l'eau depuis les racines jusqu'à la tige et ensuite vers les feuilles.

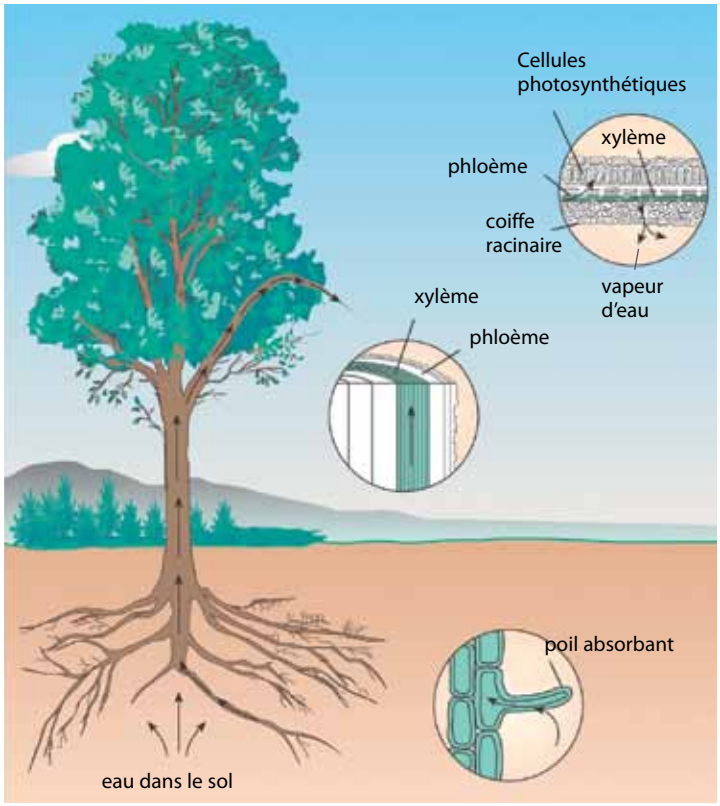


Figure 4.
Acheminement de l'eau à l'intérieur d'un arbre.

Alors que l'eau est acheminée dans les parties de la plante, les sucres et les acides aminés doivent se déplacer des feuilles jusqu'aux parties non photosynthétiques de la plante. Le phloème est constitué de cellules vivantes nommées cellules criblées qui forment un tube. L'ensemble des perforations aux extrémités des parois cellulaires forme des plaques criblées. Le cytoplasme d'une cellule criblée est relié au cytoplasme d'une cellule criblée adjacente par le biais des perforations, formant ainsi un tube criblé continu. À mesure que les cellules criblées vieillissent, elles perdent leur noyau et d'autres organites. À côté de chaque cellule criblée se trouve une cellule compagne de plus petite taille qui possède un noyau. Les cellules compagnes seraient responsables de réguler l'activité des cellules criblées.

Des expériences ont démontré que ce mouvement se produit à une vitesse plusieurs milliers de fois plus rapide que celle pouvant être atteinte par le processus de diffusion. Les sucres se déplaceraient, dit-on, à travers le phloème par un processus de pression-débit. Selon ce processus, l'eau et les sucres dissous voyageraient à travers les tubes criblés à partir de zones à forte pression jusqu'à des zones à faible pression. Les sucres produits dans les feuilles sont acheminés dans le phloème par transport actif. La concentration élevée de sucres fait en sorte que l'eau s'écoule dans les cellules du phloème, faisant augmenter ce qu'on appelle la pression de turgescence à l'intérieur de la cellule. Cette forte pression de turgescence pousse la solution d'eau sucrée dans la cellule adjacente du phloème, augmentant ainsi la pression de turgescence. Ce processus se répète d'une cellule à l'autre jusqu'à ce que la solution atteigne une cellule qui l'utilisera. À destination, le sucre est retiré du phloème par transport actif. L'eau également est retirée de la cellule du phloème, permettant ainsi de régénérer la pression moins élevée de turgescence nécessaire pour maintenir les liquides en mouvement.

6.0 Les carences en nutriments des plantes

Les humains et les plantes sont des types d'organismes très différents. Par exemple, les humains ont du sang et les plantes ont de la sève. Les humains sont des consommateurs et les plantes, des producteurs. En dépit de leurs nombreuses différences, les humains et les plantes sont tous deux constitués de cellules. Afin que les cellules soient en bonne santé, elles doivent se nourrir de certains nutriments. Si une personne est dépourvue de vitamines, de minéraux ou d'autres éléments essentiels, elle souffrira de carences. Nous connaissons bien les résultats des carences en éléments nutritifs. Par exemple, si une personne manque de fer, il ou elle deviendra anémique, ou si une personne manque de calcium, ses os deviendront fragiles. Tel qu'il a été discuté à la section *2.0 Les plantes et leurs éléments essentiels*, les plantes ont besoin d'une variété d'éléments nutritifs en quantités variables, afin de soutenir une croissance saine. Une carence en nutriments se produit si un nutriment n'est pas disponible en quantité suffisante pour répondre aux

besoins de la plante. La toxicité des nutriments se produit lorsqu'un nutriment est présent en trop grande quantité, de telle sorte qu'il nuit à la plante. Le tableau 8 dresse la liste de la plupart des nutriments essentiels et décrit ce qui se produit lorsque les plantes en absorbent en quantités excessives ou insuffisantes.

Tableau 8.
Les symptômes des carences et de la toxicité

Nutriment	Condition	Symptômes
Azote	Carence	Feuilles vert pâle à jaunes; croissance arrêtée; faible taux de protéines; faible développement des fruits
	Toxicité	Feuilles vert foncé; sensible à la sécheresse, aux maladies et aux insectes
Phosphore	Carence	Feuilles teintées de violet; croissance et développement arrêtés; augmentation des maladies; plus faible tolérance à la sécheresse
	Toxicité	Carences en oligo-éléments, particulièrement en zinc et en fer
Potassium	Carence	Jaunissement sur le côté des feuilles âgées; feuilles mortes; développement irrégulier des fruits; plus faible tolérance à la sécheresse
	Toxicité	Carence en magnésium et possiblement en calcium
Calcium	Carence	Faible développement des fruits et mauvaise apparence; les symptômes apparaissent chez les pousses et les nouvelles feuilles
	Toxicité	Carences en magnésium et en potassium (à cause des précipitations sur le sol)
Magnésium	Carence	Jaunissement des feuilles les plus âgées; faible développement des fruits
	Toxicité	Ralentissement de la croissance, possiblement en raison d'un déséquilibre en calcium et potassium
Soufre	Carence	Jaunissement des jeunes feuilles; sinon ressemble à une carence en azote
	Toxicité	Chute prématurée des feuilles
Fer	Carence	Parties jaunes ou blanches sur les jeunes feuilles, entraînant des taches de cellules mortes
	Toxicité	Feuilles de couleur bronze et de petites taches brunes
Manganèse	Carence	Jaunissement des jeunes feuilles ou jeunes feuilles tachetées
	Toxicité	Taches brunes sur les feuilles plus âgées
Zinc	Carence	Jaunissement des jeunes feuilles; croissance arrêtée et retard de maturité
	Toxicité	Possible carence en fer
Bore	Carence	Feuilles déformées et décolorées; mort de points de croissance
	Toxicité	Pointes de feuilles jaunies, apparence brûlée; chute prématurée des feuilles
Molybdène	Carence	Chlorose globale, feuilles tachetées
	Toxicité	Feuilles orange vif

Adapté du document de Bennett, W. (Ed.). (1993). *Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants*. St. Paul, MN : APS Press.

Comme discuté précédemment, lorsqu'une plante souffre d'un déséquilibre en nutriments, elle présente des symptômes spécifiques à ce nutriment. Un agriculteur préoccupé par la santé de ses cultures doit utiliser des outils scientifiques pour prévenir les carences et, si nécessaire, examiner les symptômes et poser un diagnostic, tout comme un médecin le fait en examinant un patient souffrant d'une carence alimentaire.

Des examens du sol et des cellules végétales sont utilisés pour détecter les déséquilibres en nutriments. Lorsque le problème a été cerné, l'agriculteur prend les mesures nécessaires pour corriger le déséquilibre. Les agriculteurs « prescrivent » des engrais à leurs cultures, un peu comme le font les médecins lorsqu'ils prescrivent des vitamines à leurs patients.

7.0 Nourrir les plantes avec des nutriments pour plantes

Comme discuté précédemment, les plantes cultivées dans des sols appauvris en nutriments peuvent présenter une grande variété de symptômes et limiter considérablement la quantité et la qualité des récoltes. Les engrais commerciaux et les biosolides recyclés tels, que le fumier, sont en réalité de la nourriture pour les plantes. Ils sont ajoutés à la terre afin de combler les carences en nutriments causées indirectement par les récoltes. Dans les écosystèmes non agricoles, les nutriments extraits par les plantes sont retournés dans le sol lorsque les plantes meurent et se décomposent. Sur les terres agricoles, certains de ces nutriments sont extraits lors des récoltes, donc il est souvent nécessaire de les remplacer par des engrais. Les éléments essentiels de la plupart des engrais organiques ou minéraux comprennent les macronutriments suivants : l'azote, le phosphore et le potassium. Chacun de ces trois éléments jouent un rôle crucial en permettant aux plantes d'accéder à l'énergie libre du soleil grâce à la photosynthèse, et doivent être présents en quantité suffisante pour assurer une saine croissance des cultures.

Tableau 9.
L'importance de certains macroéléments essentiels

Azote
- Composante des protéines et des acides nucléiques
- Nécessaire pour la production de chlorophylle

Phosphore
- Composante des acides nucléiques et de certaines protéines
- Nécessaire pour le transfert d'énergie
- Important pour la germination des graines et l'utilisation de l'eau

Potassium
- Nécessaire en tant que régulateur pour
  - un usage efficace de l'eau
  - le transfert de la nourriture
  - la protection contre les facteurs de stress

Soufre
- Composante des protéines
- Nécessaire pour les enzymes associés à
  - la photosynthèse
  - la production de chlorophylle
  - la fixation de l'azote

Depuis près de 10 000 ans, les humains pratiquent l'agriculture. Même les anciens agriculteurs épandaient de l'engrais sur leurs cultures. L'utilisation des résidus humains et animaux pour accroître la fertilité du sol a été observée en Chine il y a plus de 2000 ans. Au cours de la période « d'âge d'or » de la Grèce, de 800 à 200 av. J.-C., les historiens discutaient de méthodes qui consistaient à utiliser les eaux usées et à classer le fumier en fonction de leur valeur en nutriments pour les récoltes. Même si ces anciennes méthodes n'avaient jamais fait l'objet d'une étude approfondie, chimiquement parlant, les agriculteurs étaient attentifs et avaient appris par essai-erreur les meilleures méthodes à utiliser pour favoriser une meilleure croissance de leurs cultures. Les engrais minéraux sous forme de salpêtre ou de nitrate de potassium étaient mentionnés pas des écrivains grecs et romains, et dans la Bible. Les anciens Grecs utilisaient également des saumures comme nutriments pour les palmiers.[4]

Justus Von Liebig (1803–1873) est connu comme le fondateur de l'industrie moderne des engrais. En utilisant les écrits d'autres scientifiques ainsi que ses propres découvertes, Liebig a formulé une théorie en matière de minéraux, selon laquelle les cultures croissent ou diminuent en proportion équivalente à la quantité de nutriments utilisés. Liebig insistait

sur l'importance de remplacer les nutriments perdus pour maintenir la fertilité des sols. Il a également élaboré la « loi du minimum », qui stipule que si un élément essentiel se retrouve en quantité insuffisante, la croissance de la plante sera moindre, même si tous les autres éléments essentiels se retrouvent en quantité suffisante. Si la carence en cet élément nutritif est comblée, on pourra observer une croissance qui sera un jour limitée par un facteur autre que la carence observée.[11]

Le concept de la loi du minimum a été modifié au fil du temps, à mesure que les scientifiques comprenaient mieux les variables qui influent sur la croissance des plantes. L'humidité, la température, le contrôle des insectes et des mauvaises herbes, la lumière, la population végétale, les capacités génétiques des variétés de plantes font maintenant partie de cette règle.

Le premier engrais commercial à voir le jour était constitué de nitrate de sodium extrait des gisements naturels du Chili et importé dans le monde occidental à partir des années 1830. Vers la même époque, le sulfate d'ammonium, un sous-produit de la fabrication du gaz de houille généralement utilisé pour l'éclairage, était vendu comme engrais commercial.[4]

De nos jours, les engrais commerciaux proviennent de différentes ressources naturelles; qui sont traités de diverses manières, tel que décrit dans les sections ci-dessous. L'extraction minière, la fabrication, la transportation et la vente d'engrais commerciaux jouent un rôle important dans l'économie canadienne et mondiale. Au Canada, la production d'engrais commerciaux est soumise à une multitude de règles environnementales, tout comme les procédés de fabrication.

Figure 5.
Selon la loi du minimum, la croissance des plantes sera lésée si un seul élément essentiel se retrouve en quantité insuffisante.

7.1 Azote (le bâtisseur)

L'azote (N) est élément essentiel pour tous les organismes. C'est une composante de chaque acide aminé, par conséquent, il est essentiel à la fabrication de protéines. Faisant partie intégrante de la molécule de chlorophylle, l'azote permet aux plantes de conserver leur couleur verte. L'azote, tout comme le magnésium, est le seul élément de la molécule de chlorophylle que la plante se procure dans le sol.

Une croissance accrue de la plante est associée à une quantité adéquate de ce nutriment, en partie parce que l'azote joue un rôle clé dans la division cellulaire. Si la division cellulaire est ralentie ou interrompue, la croissance des feuilles le sera également, ce qui aura une incidence sur la surface de la feuille exposée au soleil. Lorsque seule une petite superficie est exposée au soleil, la capacité de la plante à produire de la biomasse est limitée (le rendement). En plus d'accroître le rendement des cultures, l'azote améliore la qualité des cultures en augmentant leur teneur en protéines. Les cultures nécessitent généralement plus d'azote que les plantes non agricoles pour atteindre une croissance optimale.

En 1918, les scientifiques Fritz Haber (1868–1934) et Carl Bosch (1874–1940) se sont vu décerner le prix Nobel pour avoir mis au point un engrais à base d'azote par la synthèse de l'ammoniac à partir d'azote gazeux et d'hydrogène. Bien que ce procédé ait été modifié à maintes reprises, la découverte de Haber-Bosch demeure encore aujourd'hui la méthode utilisée pour la fabrication commerciale des engrais à base d'azote. Le procédé Haber-Bosch a permis une augmentation de la quantité de plantes produites grâce aux engrais à base d'azote de l'ordre de 60 à 70 pour cent, comparativement aux processus naturels comme la fixation de l'azote et la foudre.[30] Il est aussi estimé que les engrais commerciaux à base d'azote rendent possible la croissance de 48 pour cent des récoltes mondiales. Au Canada, l'ammoniac est à la fois utilisé comme engrais, dans les régions des prairies de l'Ouest, et il est un pillier pour tous les autres engrais

Figure 6.
Les feuilles de maïs sur la gauche sont en bonne santé. Les feuilles de droite ont un niveau d'azote insuffisant.

azotés, à l'exception de ceux qui sont minés. . L'utilisation de l'ammoniac s'estompe d'ouest en est au Canada (nord-est CB, AB, SK, MB, ON, QC). L'ammoniac n'est pas utilisé dans l'Est du Québec en raison de la condition des sols, des types de cultures, de la taille des champs et des installations de manutention des engrais. L'ammoniac contient 82 pour cent d'azote et représente un élément important de la plupart des engrais à base d'azote. L'urée est également une autre source d'azote, laquelle provient d'une réaction entre l'ammoniac et le dioxyde de carbone, et contient 46 pour cent d'azote.

Les sources organiques d'azote ont longtemps été utilisées comme engrais. Pendant des milliers d'années, le recyclage des nutriments sous forme de fumier a été pratiqué. Entre les années 1850 et 1900, les principales substances organiques étaient les excréments humains, les tourteaux de coton, les déchets de poissons et les résidus d'abattoir. Jusqu'à 1910, les agriculteurs Canadiens utilisaient l'azote provenant principalement de sources organiques, telles que le fumier, la tourbe, les algues et le guano (azote du Chili). Alors que l'utilisation des engrais commerciaux connaissait une augmentation au Canada, la proportion des apports en nutriments provenant de sources organiques a diminué. Ces nutriments organiques sont toujours importants pour les sols cultivés qui se trouvent à proximité des exploitations d'élevage, puisqu'il est estimé que les engrais commerciaux approvisionnent seulement le sol de 52 pour cent de l'azote exigée nécessaire.[16]

Une nouvelle forme d'engrais a été mise au point dans les années 1950, ce sont les boues d'épuration. Celles-ci sont faites d'eaux usées filtrées et centrifugées pour enlever les débris, l'huile, la graisse et le sable. Les eaux usées sont alors oxygénées pour aider les micro-organismes à décomposer la biomasse. L'excès d'eau est retiré, et le produit final est un gâteau épais et fibreux, séché dans des fours à haute température afin de tuer tous les micro-organismes et les éléments pathogènes.

7.2 Phosphore (la source d'énergie)

Le phosphore (P) se trouve dans chacune des cellules vivantes. Chez les plantes, il sert à la fois d'élément structural et de catalyseur de réactions biochimiques. Le phosphore est un des éléments de l'ADN et de l'ATP (la molécule d'énergie de la cellule). Il joue également des rôles cruciaux, soit de capturer la lumière lors de la photosynthèse, d'aider à la germination des graines et d'aider les plantes à utiliser l'eau de manière efficace. Les plantes utilisent aussi le phosphore pour aider à combattre les facteurs externes de stress et pour prévenir les maladies.

Les ossements humains et animaux contiennent du phosphate de calcium insoluble. Il y a 2000 ans, les agriculteurs chinois traitaient les os avec de la chaux et les répandaient dans leurs champs. Le traitement à la chaux était nécessaire pour convertir le phosphate de calcium en une forme plus soluble que les racines des plantes pouvaient assimiler.

Les ossements de bisons ont également été utilisés comme engrais. Au début des années 1800, le sud de la Saskatchewan hébergeait un grand nombre de bisons, et des milliers d'autochtones de la région dépendaient d'eux pour se nourrir et pour se vêtir de leurs peaux. Le ruisseau Wascana, en Saskatchewan,

était le meilleur endroit pour capturer les bisons. Les Cris entassaient les os, car ils croyaient que les bisons vivants ne quitteraient pas les os morts des bisons, et que tant qu'il y aurait une pile d'ossements, il y aurait des bisons à chasser. Les piles d'ossements que les Cris appelaient *« Okana ka-asateki »* atteignaient parfois deux mètres de hauteur et treize mètres de diamètre. Lorsque le Colonel John Palliser, un explorateur irlandais, est arrivé au Canada en 1857, il a entendu ce nom cri et appela le ruisseau Wascana. Avant cela, la pile s'appelait *« Pile-o-Bones »* (pile d'ossements). Le tas d'ossements aurait été vendu par les colons pour la production d'engrais pour la somme de 15 000 $.[16]

Figure 7.
Les plants de maïs carencés en phosphore ont des feuilles teintées de violet.

Dans les années 1800, les fabricants d'engrais voulaient produire des engrais à base de phosphore, car ce nutriment était plus efficace et il se trouvait en quantité plus abondante que les ossements. Ils se sont donc tournés vers des dépôts naturels de roches phosphatées provenant de restes fossiles de milieux marins disparus, dans des dépôts de phosphate du monde entier. Le phosphate contenu dans ces dépôts existe sous différentes formes d'un composé très stable nommé apatite. Pour fabriquer des engrais de phosphate, la roche phosphatée doit être traitée à l'acide ou à la chaleur pour rendre le phosphore plus soluble et donc plus assimilable pour les plantes. La production de superphosphate a vu le jour en Caroline du Sud, aux États-Unis, en 1849.

7.3 Potassium (le régulateur)

Le potassium (K) est essentiel au fonctionnement de chaque cellule vivante. Bien que le potassium ne fasse partie d'aucune partie importante de la plante, il joue des rôles cruciaux dans plusieurs processus physiologiques. Le potassium active des enzymes qui catalysent les réactions chimiques liées à la croissance. Il joue également un rôle important dans l'équilibre de l'eau en régulant l'ouverture et la fermeture des stomates (les pores des feuilles par lesquels les gaz sont échangés). Le potassium intervient également dans la photosynthèse grâce à son rôle dans la production d'ATP. D'autres aspects de la santé des plantes sont influencés par le potassium, notamment la croissance de tiges solides, la protection contre les températures extrêmes et la capacité à lutter contre les facteurs de stress et les ravageurs tels que les mauvaises herbes et les insectes.

Figure 8.
Une feuille de plant de maïs carencée en potassium. Les taches sombres représentent des zones de cellules mortes.

Le potassium utilisé pour fabriquer des engrais provient des mines de sels sédimentaires issues de l'évaporation de mers et de lacs disparus. Presque tous les engrais de potassium se trouvent sous la forme de chlorure de potassium, mais ont moins de dépôts de sulfate de potassium. L'industrie de fabrication d'engrais de potassium a fait son apparition en Europe de l'Ouest, où se trouvent les plus grands dépôts de ces minerais. Le Canada possède, en Saskatchewan, des réserves de potassium parmi les plus imposantes au monde et une plus petite réserve au Nouveau-Brunswick. Le Canada est le premier fournisseur mondial en engrais de potassium.

7.4 Le soufre (le synthétiseur)

Le soufre (S) est l'un des éléments les plus abondants dans le sol et l'un des premiers éléments à être décrit par les scientifiques. Tout comme l'azote, le soufre est un élément essentiel dans la vie d'une cellule. Il est l'une des composantes des deux acides aminés, méthionine et cystéine, utilisés dans la synthèse des protéines de tous les organismes vivants. Le soufre est également essentiel à la photosynthèse et à la synthèse de la chlorophylle. Le soufre est extrait des gaz naturels et du pétrole brut, de la fusion de certains minerais métalliques et de gaz produits par la combustion du charbon.

7.5 Les oligo-nutriments

Parmi les oligo-nutriments, voici les quatre types de carences généralement traitées par l'utilisation d'engrais :

- **Le bore (B)** est un nutriment essentiel à la croissance et au développement de nouvelles cellules. Chez les plantes, le bore aide à réguler la floraison, la pollinisation, le développement des graines et le transport des sucres.
- **Le cuivre (Cu)** est un régulateur de haute importance de plusieurs systèmes enzymatiques végétaux et est nécessaire à la synthèse des protéines et au métabolisme azoté.
- **Le manganèse (Mn)** fait partie de plusieurs systèmes enzymatiques végétaux et joue un rôle dans la photosynthèse, soit la régulation de la synthèse de la chlorophylle.
- **Le zinc (Zn)** est un régulateur d'enzyme essentiel lors de la synthèse des protéines, de l'amidon et des hormones de croissance.

7.6 Les engrais organiques et commerciaux

Il y a eu une augmentation de la vente de produits certifiés biologiques par le biais des épiceries traditionnelles. En 2006, le Centre d'agriculture biologique du Canada (CABC) a indiqué que les ventes totales de produits alimentaires biologiques avaient fait un bon de 28 pour cent entre 2005 et 2006. Le nombre d'exploitations agricoles certifiées biologiques a augmenté de près de 60 pour cent depuis 2001. La Saskatchewan, suivie du Québec, était la province qui comptait le plus grand nombre d'exploitations biologiques. Malgré cette augmentation, moins de 1 pour cent des 46,5 milliards de dollars dépensés en épicerie par les Canadiens en 2006 a servi à se procurer des produits biologiques certifiés.[15]

Les agriculteurs qui épandent des engrais sur leurs cultures ont le choix d'utiliser des engrais organiques ou commerciaux, ou une combinaison des deux. Comme son nom le suggère, l'engrais organique provient de matières mortes telles que du fumier végétal ou animal. Par ailleurs, les engrais commerciaux sont composés d'ingrédients naturels qui ont été soumis à un procédé chimique pour créer un engrais à teneur plus élevée et plus uniforme en nutriments. Les engrais commerciaux proviennent soit de gisements de minéraux naturels ou dans le cas de l'azote, de l'atmosphère terrestre. Chimiquement, il n'y a aucune différence entre un atome d'azote provenant d'un engrais, de fumier animal, d'un tas de compost ou de l'atmosphère. Si l'azote prend la même forme (par exemple, de l'ammonium, du nitrate ou de l'urée), il n'y a pas de différence pour les plantes. Toutefois, il existe des différences dans la quantité d'azote, provenant de ces sources, qui est assimilable par les plantes et dans la quantité d'azote par rapport aux autres éléments tels que le phosphore.

Du point de vue des plantes, il n'y a aucune différence entre un atome d'azote peu importe qu'il provienne d'engrais, de fumier, d'un tas de compost, ou même de l'atmosphère. Dans la mesure où les plantes sont concernées si les nutriments sont dans la même forme, par exemple l'ammonium, du nitrate ou de l'urée, il n'y a pas de différences. Malgré tout, il y a des différences dans la vitesse à laquelle l'azote provenant de diverses sources est absorbée et rendue disponible pour que les plantes l'utilisent et le ratio d'azote comparativement à d'autres éléments comme le phosphore.

Une distinction importante s'impose entre les engrais organiques et commerciaux, soit les quantités de nutriments qu'ils contiennent et les connaissances des agriculteurs à ce sujet. Contrairement aux engrais commerciaux, les sources de nutriments organiques ne garantissent généralement pas la teneur en nutriments. Les matières organiques peuvent fournir une quantité élevée d'un nutriment et une quantité faible d'un autre, créant ainsi un déséquilibre pour les plantes. En revanche, les engrais commerciaux contiennent des quantités calculées et souvent élevées en nutriments,ce qui est pratique pour les agriculteurs lorsqu'il est tempsd'épandre en quantités optimales les engrais permettant ainsi aux plantes de combler leurs besoins et de réduire les pertes de nutriments dans l'environnement.

L'un des avantages des engrais organiques à base de matières végétales (par exemple, le composte) est que les nutriments sont libérés lentement, de sorte qu'ils sont moins susceptibles de se retrouver en quantités plus élevées que ce dont les plantes ont besoin. Pour cette raison, ils sont souvent considérés comme moins dommageables pour l'environnement que les engrais minéraux. Toutefois, les sources organiques à base de fumier sont généralement plus volatiles ou sujettes à se répandre dans l'environnement que les engrais commerciaux. Si un nutriment commercial ou organique est appliqué en quantités supérieures à ce que les plantes peuvent utiliser, les surplus pourraient se disperser dans les champs ou dans l'air et contribuer à la pollution par les nutriments (voir la section *8.1 La pollution par les nutriments*). La plupart des engrais organiques utilisés en agriculture sont fabriqués à partir de fumier.

7.7 Répondre aux besoins en nutriments des cultures

Les engrais commerciaux peuvent être appliqués sous forme liquide ou solide, ou dans le cas de l'ammoniac anhydre, en gaz pressurisé injecté dans le sol. On trouve sur le marché une variété de mélanges d'engrais. Leur contenu est détaillé sur l'étiquette de l'emballage. Le pourcentage en poids des trois macroéléments, soit l'azote, le phosphore et le potassium, est indiqué comme étant le ratio NPK de l'engrais. Par exemple, une étiquette indiquant un ratio NPK de 24-6-6 signifie que l'engrais contient 24 pour cent d'azote, 6 pour cent de phosphore (P_2O_5) et 6 pour cent de potassium (K_2O). Certains engrais contiennent aussi des élements secondaires appelés oligo-éléments, lesquels sont des nutriments nécessaires en petites quantités pour assurer la santé et la croissance des plantes. Les étiquettes des sacs d'engrais indiquent également les quantités d'oligo-éléments ainsi que toute matière inerte, telle que du sable, qui a été insérée pour donner du volume et faire en sorte que l'engrais soit plus facile à épandre. Les engrais organiques préparés pour la vente des ménages ou les marchés agricoles doivent aussi porter la quantité d'éléments inertes sur leur étiquette. Une étiquette organique normale pourrait par exemple avoir une garantie 2-6-4.

Figure 9.
Une étiquette que l'on trouve sur un sac d'engrais commercial. Elle indique les proportions d'azote, de phosphore et de potassium.

Les agriculteurs utilisent des méthodes scientifiques pour déterminer l'équilibre approprié de nutriments nécessaires à leurs cultures. Puisque chaque terre agricole est différente, les agriculteurs doivent pouvoir établir les meilleures pratiques de gestion (MPG), en fonction des conditions de croissance. Certains facteurs, notamment les sols, le climat, la topologie et les besoins en nutriments, sont susceptibles d'influencer le choix des MPG. Souvent, les agriculteurs collaborent avec un conseiller agricole certifié, soit un professionnel en gestion des nutriments, pour évaluer les conditions de croissance et les conditions environnementales et mettre sur pied un plan de gestion des nutriments. La composition des sols agricoles varie beaucoup, et c'est parfois le cas des différentes terres d'une seule exploitation agricole. Pour s'assurer que les cultures reçoivent la dose exacte de nutriments tout en minimisant les pertes de nutriments dans l'environnement, il faut tenir compte d'un certain nombre de variables, dont la teneur en nutriments du sol et les besoins en nutriments des cultures. Il se peut que les sols contiennent des nutriments en quantités suffisantes. Avant d'épandre les engrais, les agriculteurs doivent mesurer les quantités d'azote, de phosphore et de potassium déjà présentes dans le sol. Ensuite, ils pourront choisir l'engrais adéquat qui saura répondre aux besoins des cultures. Parfois, les engrais sont constitués d'un mélange fait sur mesure pour répondre aux besoins de l'agriculteur. Lorsque le bon produit a été choisi, le plan de gestion des nutriments doit tenir compte des critères décrits dans le tableau 10.

Tableau 10.
L'utilisation des engrais dans un plan de gestion des nutriments

Critère	Description
La bonne dose	Épandez les nutriments en quantité équivalente à ce que la plante peut assimiler. Si la quantité est insuffisante, vous n'obtiendrez pas le rendement optimal convoité. Si la quantité est trop élevée, vous gaspillerez des nutrimentset ce dernier sera dispersé dans l'environnement.
Le bon moment	Choisissez le meilleur moment pour épandre les nutriments. La source de nutriments devrait être appliqué lorsque les cultures ont besoin de nutriments. Par exemple, en ce qui a trait à l'azote, le matériel devrait être appliqué le plus près possible du moment d'absorption de la plante.
Le bon endroit	Les agriculteurs doivent s'assurer que les nutriments sont appliqués là où les racines y ont le plus facilement accès. Une application attentionnée limite les pertes de nutriments. Évitez les zones écologiquement vulnérables telles que les eaux de surface, afin que les nutriments ne se répandent dans l'eau.
Le bon produit	Les agriculteurs doivent s'assurer que le type d'engrais organique ou commercial utilisé correspond aux besoins des cultures.

7.8 Organique ou commercial : lequel est le meilleur?

La réponse la plus simple à cette question serait la suivante : les sources de nutriments organiques ou commerciaux ne sont ni l'une ni l'autre meilleures pour les plantes. Les deux types d'engrais ont leur place dans l'agriculture et devraient être utilisés le cas échéant. Chacun comporte des avantages et des inconvénients.

Les agriculteurs doivent examiner les valeurs relatives à chacun des types d'engrais et décider à quel moment et à quel endroit les utiliser. Puisque la plupart des engrais organiques qu'utilisent les agriculteurs proviennent d'animaux d'élevage, nous allons donc nous attarder aux engrais organiques à base de fumier.

L'utilisation de fumier organique encourage l'exploitation de ressources naturelles locales. Pour le fabriquer, on n'utilise que peu ou aucun additif synthétique. Les engrais à base de fumier peuvent être considérés comme des suppléments en nutriments économiques et agronomiques, comme les engrais minéraux, pour la production agricole. Les matériaux organiques contiennent des quantités variables de nutriments pour les plantes et fournissent du carbone organique, lequel se retrouve dans toutes les terres agricoles à rendement élevé. Aussi, ils augmentent les caractéristiques biologiques, chimiques et physiques des sols.

Toutefois, certaines formes d'engrais organiques à base de fumier soulèvent des préoccupations. Tout d'abord, lorsque le fumier animal est produit dans des zones confinées, des quantités excessives de nutriments peuvent s'accumuler dans les champs cultivés si le fumier est appliqué en trop grande quantité près de sa zone de production. Cela peut poser un risque de lessivage des nitrates vers les eaux souterraines et le déplacement du phosphore vers les eaux de surface par le ruissellement et l'érosion. Ensuite, les proportions relativement constantes de nutriments dans les engrais organiques peuvent entraîner une trop grande présence de phosphore dans les sols recouverts d'une épaisse couche de fumier, car les cultures nécessitent habituellement beaucoup moins de phosphore que d'azote. En outre, d'importantes quantités de gaz ammoniac (NH_3) peuvent s'échapper dans l'atmosphère.

En comparaison aux engrais organiques à base de fumier, la teneur en nutriments des engrais organiques à base végétale est généralement faible. Ils contiennent des nutriments solubles, mais la plupart sont libérés lentement, à mesure que les microbes du sol décomposent les matières organiques en une forme soluble à l'eau que les racines des plantes peuvent assimiler. Cet aspect peut s'avérer avantageux lorsque l'engrais est appliqué moins fréquemment, car il est moins susceptible de saturer le sol en nutriments solubles, ce qui pourrait entraîner des pertes de nutriments dans l'environnement.

Figure 10.
L'agriculture organique recycle les nutriments en utilisant du compost (a) et du fumier (b).

Les engrais commerciaux contiennent des quantités précises et garanties de nutriments, en une forme qui peut immédiatement être absorbée et assimilée par les plantes. Il est possible de mesurer le temps d'épandage et ainsi de mieux répondre aux besoins en nutriments des cultures. Cela permet aussi d'utiliser efficacement les nutriments tout en miniminisant les risques pour l'environnement. En raison de leur haute teneur en nutriments, il est facile et économique de livrer les engrais commerciaux partout dans le monde, à partir de leur lieu de production.

Cependant, la teneur élevée en nutriments des engrais commerciaux pose également un risque de surutilisation des produits. Un agriculteur doit épandre les engrais commerciaux tel qu'il est spécifié dans le plan de gestion des nutriments qui a été spécifiquement conçu pour répondre aux besoins de ses champs. Les plans de gestion des nutriments comportent des données provenant des sols et des tissus végétaux et sont destinés à informer l'agriculteur des bonnes quantités de nutriments à utiliser et du meilleur moment d'épandage. Les plans de gestion des nutriments organiques ou commerciaux permettent aux agriculteurs d'économiser de l'argent en leur évitant d'utiliser trop d'engrais et leur permettent de moins répandre de nutriments indésirables dans l'air, les eaux souterraines et les cours d'eau locaux. Par exemple, même si l'utlisation des engrais à travers l'agriculture peut faire augmenter les risques d'érosion causée par les vents ou par l'eau, la plupart des cultures fertilisées adéquatement connaissent une croissance suffisamment forte pour que les résidus de cultures qui demeurent à la surface du sol après les récoltes puissent être gérés à l'aide d'une diminution du travail aratoire et d'un contrôle adéquat de l'érosion des sols.

8.0 Les nutriments végétaux et l'environnement

La pollution par les nutriments provient de nombreuses sources : des fonctions de l'écosystème naturel à une variété d'activité humaine, en passant par l'agriculture.

Les éléments nutritifs sont une partie intégrale de l'environnement et naturellement entre dans la biosphère des intempéries et des procédés d'érosion. Les sources de pollution humaine comprennent l'agriculture, les usines de traitement des eaux usées et des eaux pour le traitement des plantes, les centrales électriques au charbon et les gaz émannant des automobiles. L'importance de ces polluants varie considérablement en relation entre les zones rurales et urbaines. Contrôler la pollution des nutriments signifie que nous devons identifier les différentes sources et que nous devons mettre en œuvre des politiques publiques qui limitent l'excès de pertes de nutriments dans l'environnement.

Nul ne conteste le fait qu'une application adéquate d'engrais organiques et commerciaux augmente le rendement des cultures. Il existe toutefois une préoccupation au sujet de leur utilisation : les plantes peuvent être exposées à une quantité de nutriments plus grande que ce qu'elles peuvent absorber, en particulier lorsque ceux-ci sont appliqués incorrectement. Dans de tels cas, l'excès de nutriments se disperse dans les champs lorsqu'il pleut et pénètre dans les rivières, les ruisseaux, les lacs et les océans, soit des endroits où les nutriments ne sont pas les bienvenus et causent ainsi des dommages à l'environnement. Une trop grande quantité de nutriments dans les milieux aquatiques favorise la croissance d'algues et d'organismes similaires, entraînant aussi une dégradation générale de la qualité de l'eau. Les nutriments peuvent également s'échapper dans les eaux souterraines et dans l'atmosphère, provoquant ainsi des problèmes de santé chez les humains et contribuant au réchauffement de la planète.

8.1 La pollution par les nutriments

Comme nous l'avons déjà vu, les organismes ont besoin de nutriments essentiels pour survivre, mais ils doivent être appliqués en bonnes quantités, car une quantité excessive ou insuffisante de nutriments pourrait nuire à leur santé. La situation est similaire pour l'environnement. L'un des plus grands défis en matière de qualité de l'eau, non seulement au Manitoba, mais aussi dans d'autres juridictions du Canada, des États-Unis, de l'Europe et d'ailleurs, est l'augmentation progressive du niveau d'azote et de phosphore dans les systèmes des eaux.

Les quantités excessives de phosphore et d'azote favorisent la production d'algues et d'autres plantes aquatiques. La prolifération d'algues peut perturber l'habitat aquatique, réduire les taux d'oxygène, boucher les filets de pêche commerciale, nuire aux installations de traitement des eaux et changer l'odeur et le goût de l'eau.[18] La pollution par les nutriments, en particulier par l'azote, peut mener à la croissance accélérée d'organismes aquatiques par un processus nommé eutrophisation. La prolifération d'organismes tels que le phytoplancton et les algues réduit la quantité de lumière du soleil à la disposition des végétaux aquatiques. Leur métabolisme épuise les eaux profondes d'oxygène et entraîne la suffocation des organismes qui ne peuvent s'éloigner des zones dépourvues d'oxygène. Les scientifiques ont démontré que les zones dépourvues d'oxygène s'accroissent dans les estuaires et dans les zones côtières du monde entier. Des concentrations élevées de nitrates dans les réserves d'eau peuvent causer du tort à la santé des humains. L'effet le plus grave sur la santé est la méthémoglobinémie, souvent appelée le syndrome du « bébé bleu ». Des données récentes laissent croire qu'il n'existe pas nécessairement de lien entre les nitrates et le syndrome du bébé bleu, mais plutôt que les nitrates font partie de plusieurs facteurs interreliés qui causent la méthémoglobinémie.[13] Les systèmes d'aqueduc devraient contenir des niveaux de nitrates sécuritaires, puisque les nitrates peuvent être retirés par simple filtration de l'eau.

La pollution par l'azote provenant des sols cultivés, de l'industrie et d'autres sources contribue au réchauffement climatique de la planète, car une partie de cet azote est rejeté dans l'atmosphère, tout comme l'oxyde de diazote (N_2O), qui est un puissant gaz à effet de serre.

Sources ponctuelles et non ponctuelles de pollution par les nutriments

Ces excès de nutriments pénètrent dans l'environnement grâce à des mécanismes naturels et anthropiques. La pollution par les nutriments provient de sources ponctuelles ou non ponctuelles.

Les sources ponctuelles sont généralement des manufactures, des centrales électriques et des centres d'épuration.

Les sources non ponctuelles sont des sources générales telles que les exploitations agricoles, les fermes, les villes et les automobiles. L'une des principales sources diffuses de pollution par les nutriments est le développement urbain. Par exemple, le défrichage des terres pour bâtir des maisons et des usines a créé des surfaces imperméables qui n'absorbent pas l'eau, ce qui provoque des eaux de ruissellement chargées de nutriments. Une source diffuse de pollution par les nutriments est l' installation de fosses septiques qui ont proliféré, à mesure que la banlieue s'étend au-delà de la portée des systèmes d'égouts municipaux. Une autre source diffuse est les émissions de gaz d'échappement. L'azote est d'abord libéré dans l'atmosphère, mais revient à la surface lorsqu'il pleut. Bien que l'information soit difficile à trouver, on estime que jusqu'à 40 pour cent de l'azote que l'on trouve dans les milieux aquatiques de certaines régions proviennent de l'azote contenu dans l'air.[11] L'agriculture est également une source diffuse de pollution par les nutriments. L'utilisation d'engrais organiques et commerciaux peut être responsable pour les quantités excessives de

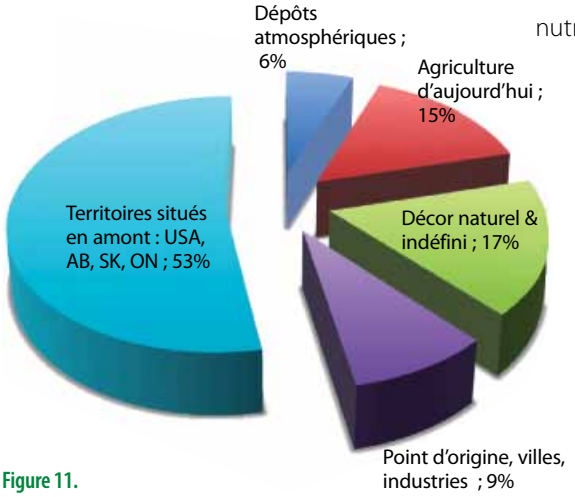


Figure 11.
%Total de phosphose dans le lac Winnipeg.) Estimation annuelle de hosphore dans le lac Winnipeg au Manitoba (1994-2001) (Adapté du Lake Winnipeg Stewardship Board, 2006)

nutriments que l'on trouve dans l'environnement, en particulier lorsqu'ils sont appliqués en quantités excédant le besoin des plantes. Ces nutriments peuvent rapidement se répandre dans les cours d'eau. De plus en plus, les agriculteurs adoptent une meilleure gestion des nutriments et des méthodes agricoles plus précises qui limitent la quantité de pollution permise.

Les sources ponctuelles de pollution par les nutriments peuvent provenir de certaines régions en particulier. La plupart de ces sources proviennent de centres d'épuration et d'installations industrielles. Dans les zones urbaines, les centres d'épuration sont possiblement des contributeurs à la pollution par les nutriments. Par exemple, on estime que la ville de Winnipeg est responsable de 4 pour cent de l'azote et de 6 pour cent du phosphore déversé dans le lac Winnipeg, au Manitoba. Au cours des 40 dernières années, les lois en matière de pollution ont été promulguées pour réduire les quantités de substances toxiques rejetées dans les eaux. En vertu de la Constitution canadienne, les provinces et les territoires exercent une juridiction sur les normes en matière de la qualité de l'eau.[18]

Les gouvernements provinciaux du Canada veulent s'assurer que les communautés sont en mesure de protéger les sources municipales d'approvisionnement en eau potable. Les municipalités, l'Office de la protection de la nature, les propriétaires de résidence, les agriculteurs, l'industrie, les groupes communautaires et les citoyens travaillent de concert pour répondre aux buts communs.[27]

8.2 La gestion des engrais à gazon

Certaines préoccupations ont été soulevées à propos du phosphore, car elle pourrait avoir contribué à l'apparition des algues bleu vert dans les lacs du Québec et du Manitoba. Les algues bleu vert, également connues sous le nom de cyanobactéries, se développent lorsqu'il y a une plus grande quantité de phosphore que d'azote dans un lac. Le phosphore est essentiel à la croissance des plantes.Comme tous les engrais, le phosphore doit être géré soigneusement. Les propriétaires peuvent utiliser des pratiques de gestion fondées sur la science pour profiter au maximum des engrais à pelouse et minimiser les pertes dans l'environnement.[9] En Ontario, le canton de Georgian Bay a récemment adopté un règlement qui interdit l'application d'engrais.[24] Il y a toujours un débat en cours à cet effet. Toutefois, les fabricants réagissent en offrant des formules d'engrais à pelouse contenant des quantités plus faibles de phosphate et l'Agence canadienne d'inspection de la nourriture a mis en place une norme de P-faible pour les engrais à pelouse. Ces approches seront-elles assez efficaces pour améliorer la qualité de l'eau de nos rivières, de nos lacs et de nos bassins? Les principes de gestion des nutriments qui ont été conçus pour les engrais agricoles s'appliquent également aux engrais à pelouses. Grâce à l'analyse des sols et à une application raisonnable, telle que des applications plus fréquentes à des doses plus faibles, il est possible de réduire les pertes de nutriments.

8.3 L'utilisation des terres

Étonnamment, les engrais ont peut-être un effet positif sur l'environnement en ce qui a trait à l'utilisation des terres.

Une discours sur l'utilisation des terres est importante à avoir. Tout de même, depuis les années 1960, les agriculteurs ont réussi à augmenter la production alimentaire d'environ 400 pour cent. La révolution verte a été rendue possible en grande partie grâce à trois innovations : l'amélioration des variétés de culture, l'utilisation d'engrais commerciaux et l'amélioration des pratiques de gestion de l'eau. L'économiste Indur Goklany a calculé que si nous devions nourrir la population actuelle de plus de 6 milliards de personnes en appliquant les méthodes organiques utilisées avant les années 1960, il faudrait consacrer 82 pour cent de la superficie terrestre de la planète à l'agriculture.[11]

Figure 12.
L'application fréquente d'engrais sur les gazons à de plus faibles doses peut aider à réduire les pertes de nutriments.

La terre est une ressource limitée et la société l'utilise à des fins diverses. Nous avons besoin de terrains pour construire des résidences et des industries, pour pratiquer nos loisirs, pour héberger la faune et, bien sûr, pour cultiver des aliments et des fibres. La culture des terres dans le monde n'a presque pas changé au cours des 50 dernières années. Bien que les agriculteurs de subsistance des pays en développement aient maintenant plus de terres à leur disposition pour pratiquer l'agriculture, certaines terres ont été consacrées à l'expansion de villes dans les pays développés.

Si, comme prévu, la population mondiale devrait atteindre un nombre bien au-delà de 8 milliards de personnes d'ici 2040, la production alimentaire devra alors suivre la cadence. Sans plus de terres agricoles disponibles, nous devrons nous tourner vers d'autres alternatives, comme augmenter la production agricole, pour pouvoir nourrir notre population.

9.0 La technologie et la gestion des nutriments

Il est clair que si nous voulons produire une alimentation adéquate pour notre population croissante, le rendement de nos cultures devra augmenter. Des stratégies devront être mises en place pour relever les défis du futur. Certains agriculteurs utilisent la technologie de multiples façons pour augmenter le rendement de leurs cultures. Bien que l'utilisation de ces nouvelles technologies ne cesse d'augmenter, ce n'est pas le cas dans la plupart des exploitations agricoles au pays. La suite de cette section décrit quelques-unes de ces technologies.

Le système d'information géographique (SIG) permet aux agriculteurs d'utiliser des cartes d'information sur les ressources naturelles, les sols, les sources d'approvisionnement en eau, la variabilité des conditions des cultures tout au long de l'année et le rendement des cultures, afin de veiller à ce que la quantité de nutriments utilisés corresponde aux besoins des cultures. Même l'information sur la quantité de résidus de culture (qui contiennent toujours des nutriments) qu'il reste à la fin de l'année et sur les quantités de nutriments retirés des récoltes peut être « cartographiée » et enregistrée dans une base de données SIG.

Figure 13.
Les agriculteurs peuvent utiliser des systèmes d'autoguidage pour épandre avec précisions des engrais. De tels systèmes comportent un GPS, un SIG et des composantes de robotique.

Lorsque ces informations sont regroupées dans une base de données, elles peuvent être intégrées à d'autres bases de données SIG, telles que des enregistrements de précipitations (provenant du radar Doppler).

Le système de positionnement mondial (GPS) est d'une grande importance pour la création de bases de données SIG et est utilisé pour déterminer l'emplacement des équipements et des personnes dans les champs. Les GPS servent aussi à évaluer la condition globale des cultures et pour effectuer du dépistage dans les champs, à la recherche de problèmes tels que des carences nutritionnelles. Les GPS aident les agriculteurs à retrouver précisément un coin de terre lorsqu'un problème a été signalé.

Le système d'autoguidage est l'une des caractéristiques de l'agriculture mécanisée. Elle regroupe le GPS, le SIG et la robotique, permettant ainsi à un conducteur de s'asseoir et de regarder la machine faire son travail. Cette technologie est utilisée sur différents types de matériel agricole comme les tracteurs, les moissonneuses-batteuses, les pulvérisateurs et les épandeurs d'engrais. Par exemple, en utilisant les systèmes d'autoguidage, les agriculteurs peuvent s'assurer de ne pas chevaucher les sillons durant l'application d'engrais. Le système d'autoguidage le plus performance peut appliquer des engrais avec une précision de moins de 1,5 cm.

La télédétection utilise les images satellites des champs pour aider les agriculteurs à surveiller leurs cultures. Les images satellites peuvent être analysées afin de détecter les variations de la réflexion de lumière visible ou infrarouge ou la lumière d'autres longueurs d'onde. On observe sur certaines images des radiations thermiques (chaleur) émises par le sol, ce qui aide à évaluer l'humidité des sols. Ces images et ces données, combinées aux données du SIG mentionnées plus tôt, offrent un moyen de détecter les problèmes dans les champs et de comparer les images à différents moments. Le niveau de variation peut être établi afin d'illustrer de quelle façon un problème se propage.

Les engrais améliorés aident à réduire les pertes en nutriments et à aider les cultures à mieux assimiler les nutriments et ainsi avoir un meilleur rendement. Ces produits fournissent des nutriments en quantités qui correspondent davantage aux besoins des plantes sans toutefois relâcher des nutriments dans l'environnement. Les engrais à libération lente ou contrôlée sont conçus pour fournir des nutriments aux cultures de manière constante. Les engrais azotés stabilisés incorporent des inhibiteurs de nitrification et des stabilisateurs d'azote, dont le rôle est de prolonger la durée pendant laquelle l'azote est assimilable par les plantes et ainsi de réduire les pertes dans l'environnement.

La technologie de modification génétique représente une autre stratégie qui comporte des conséquences possibles pour l'avenir. L'un des principaux facteurs qui limitent la croissance des cultures est l'efficacité avec laquelle les plantes assimilent et utilisent l'azote. Si les plantes cultivées pouvaient utiliser plus efficacement l'azote, la quantité d'engrais appliqués pourrait être diminuée et l'utilisation améliorée des engrais entrainera moins d'engrais à être relâchés dans l'environnement.

Le but ultime de cette recherche est de donner aux plantes non légumineuses la capacité de se procurer leur propre azote dans l'atmosphère (c'est-à-dire, de « fixer » elles-mêmes l'azote provenant de l'atmosphère) et de ne pas compter sur les engrais. Toutefois, pour donner à un plant de maïs la capacité de fixer l'azote, il faut lui ajouter un grand nombre de gènes, non seulement provenant de bactéries fixatrices d'azote, mais aussi d'une plante hôte appropriée. La perspective d'atteindre cet objectif dans un avenir rapproché est plutôt limitée. Les scientifiques sont parvenus à aider les plantes à mieux utiliser l'azote en augmentant l'expression d'un seul gène. Par exemple, les plantes qui expriment l'enzyme glutamate déshydrogénase sont destinées à croître davantage que celles qui n'ont pas été modifiées à cet effet. Bien sûr, les spécialistes en génétique limitent leurs efforts à la fixation de l'azote. Ils travaillent aussi sur une grande variété de plantes de cultures conçus pour croître plus rapidement, tolérer des environnements hostiles, résister aux parasites et augmenter leur valeur nutritive.

10.0 Conclusion

Ce module aidera les élèves à mieux comprendre le défi auquel fait face leur génération, soit de trouver des moyens de nourrir la population mondiale au 21e siècle. Une telle tâche ne peut être pleinement réalisée dans la brève période de temps accordée à l'enseignement de cette matière. Nous avons donc concentré nos efforts sur certains concepts scientifiques qui sous-tendent une saine croissance des cultures, et sur des sujets qui ont des conséquences géographiques, sociales, économiques, écologiques, juridiques, politiques et éthiques, soit la pollution et l'utilisation des terres.

Les leçons vues en classe sont conçues pour initier les élèves aux éléments essentiels et établir un lien avec la santé des plantes. Les élèves verront que même si les plantes semblent très différentes de nous, les humains, leurs cellules fonctionnent en grande partie de la même façon que les nôtres. Tout comme nous avons des nutriments provenant d'une alimentation équilibrée, les plantes ont besoin d'un apport équilibré en nutriments provenant de l'air, de l'eau et du sol.

Les élèves apprendront à considérer le sol comme une précieuse ressource naturelle qui doit être protégée. On leur demandera de considérer le sol comme une banque de nutriments dans laquelle les plantes vont puiser pour assurer leur croissance. Les nutriments dans le sol se dissolvent dans l'eau du sol, sont absorbés par le système racinaire de la plante et sont acheminés dans les autres parties de la plante par le xylème. Les nutriments sont absorbés par les racines par grâce au processus passif de diffusion et au transport actif. Une exploration des sols révèle que ces derniers se distinguent en fonction de ce qui les compose et des nutriments qu'ils contiennent. Les propriétés physiques des sols, telles que la quantité d'espaces dans le sol et la taille des particules, déterminent la quantité d'eau que le sol peut retenir et la facilité avec laquelle l'eau peut se déplacer dans le sol.

La « banque de nutriments » du sol ne peut contenir qu'une quantité limitée de nutriments. Dans les écosystèmes non agricoles, les plantes puisent ces nutriments et les retournent dans le sol lorsqu'elles meurent et se décomposent. Dans les écosystèmes agricoles, certains des nutriments extraits par les plantes sont récoltés et déplacés hors de site, ce qui peut éventuellement épuiser la banque de nutriments du sol. Tout comme les humains, lorsque les plantes reçoivent trop peu (ou trop) d'une substance nutritive, leur santé tend à se détériorer. Chaque type de carence nutritive affiche ses propres symptômes que les scientifiques et les agriculteurs utilisent pour poser un diagnostic. Les engrais sont de la nourriture pour les plantes, alors lorsque se produit une carence nutritive, l'ajout d'éléments nutritifs pour les plantes peut aider à rétablir l'équilibre du sol.

Les élèves découvriront que seule une portion de la surface terrestre est utilisée pour cultiver les aliments que nous consommons. Ils auront recours à des estimations de la croissance démographique et de l'utilisation des terres pour calculer la superficie supplémentaire nécessaire pour nourrir une population en constante croissance. Les élèves découvriront que pour produire suffisamment de nourriture pour tout ce monde, il faut prendre certaines décisions difficiles. Ils seront alors mis au défi de se mettre dans la peau d'un agriculteur et de déterminer quels sont les avantages et les inconvénients d'utiliser des

engrais organiques ou commerciaux. En outre, ils devront s'efforcer de réduire les effets négatifs sur l'environnement en réduisant au minimum la pollution par les nutriments.

Tel que mentionné précédemment, le document *Nourrir la planète au 21e siècle* n'a pas été conçu pour étudier en détail toutes les questions liées à la production alimentaire et à la croissance de la population mondiale. Nous espérons que vous trouverez dans ce module une initiation inspirante à certains concepts scientifiques importants et à certaines questions de société liées aux besoins en alimentation d'une population en pleine croissance. Les leçons vues en classe établissent des liens explicites avec le programme de sciences québécois du deuxième cycle du secondaire et peuvent servir de base à un examen plus détaillé de l'agriculture et de la nutrition. Vous trouverez peut-être que ce module peut ouvrir la voie à l'exploration d'autres sujets tels que le réchauffement de la planète et la technologie de modification génétique. Bref, nous espérons que ce module s'avérera un ajout précieux à votre enseignement.

Références

1. Arnon, D. et Stout, P. (juillet 1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology, 14* (3), 599–602.
2. Barak, P. (2003). *Essential elements for plant growth*. Récupéré le 7 juin 2005 de http://www.soils.wisc.edu/barak/soilscience326/listofel.htm
3. Beaton, J. (2008). Efficient Fertilizer Use —Fertilizer Use…A Historical Perspective. ***Agrium***. 2 juin 2008 <http://www.rainbowplantfood.com/agronomics/efu/history.pdf>.
4. Beaton, J. (2005). Fertilizer use—a historical perspective. *Efficient fertilizer use manual*. Plymouth, MN : Mosaic Company.
5. Bennett, W. (Ed.). (1993). *Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants.* St. Paul, MN : APS Press.
6. Borlaug, N. (2000). *The Green Revolution revisited and the road ahead.* Récupéré le 7 juin 2005 de www.nobelprize.org
7. BSCS. (2006). *BSCS biology: An ecological approach* (10e édition). Dubuque, IA: Kendall/Hunt.
8. Bybee, R. W. (1997). *Achieving scientific literacy: From purposes to practice*. Portsmouth, NH : Heinemann Press.
9. Institut canadien des engrais. (2007). *Canadian Fertilizer Institute Issues – Phosphorus and Blue-Green Algae*. Ottawa, ON http://www.cfi.ca/files/PDF/blue_green_Oct_20072.pdf.
10. Easterbrook, G. (1997) Forgotten benefactor of humanity, *Atlantic Monthly* 279: 74-80.
11. Fedoroff, N. et Brown, M. B. (2004). *Mendel in the kitchen: A scientist's view of genetically modified foods*. Washington, DC : Joseph Henry Press.
12. The Fertilizer Institute. (1982). *The fertilizer handbook***.** Washington, DC : Auteur.
13. Hay, DeLynn et Sharon Skipton. « Drinking Water: Nitrate and Methemoglobinemia (*«Blue Baby» Syndrome*) ». Décember 1998. NebGuide Nebraska Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln. 16 mai 2008 <http://www.p2pays.org/ref/20/19714.htm>.
14. Howarth R, D. Anderson, J. Cloern, C. Elfring, C. Hopkinson, B. Lapointe, T. Malone, N. Marcus, K. McGlathery, A. Sharpley et D. Walker (2000) Nutrient pollution of coastal rivers, bays, and seas. Issues in *Ecology* 7.
15. Kendrick, J. (2008). *Organic: from niche to mainstream.* Statistique Canada. http://www.statcan.ca/english/freepub/96-325-XIE/2007000/article/10529-en.htm.
16. Local: Regina History - Native Indians. (2008). Récupéré le 9 juin 2008 de http://www.foundlocally.com/Regina/Local/Info-CityHistoryIndians.htm.
17. Loucks-Horsley, S., Hewson, P., Love, N. et Stiles, K. (1998). *Designing professional development for teachers of science and mathematics*. Thousand Oaks, CA : Corwin Press.
18. Manitoba Water Stewardship. (2005). *Regulation Under The Manitoba Water Protection Act: Respecting Water Quality Management Zones for Nutrient.* Manitoba.
19. Ministère de l'Éducation du Québec (2009). *Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, deuxième cycle***.** Québec: Gouvernement du Québec.
20. Ministère de l'Éducation du Québec (2009). *Programme de formation de l'école québécoise, Enseignement secondaire, deuxième cycle. Science et environnement - Science et technologie de l'environnement*. Québec: Gouvernement du Québec.
21. Nutrition Business Journal (2006) U.S. Organic Food Industry VI.
22. Ouellet, M. (1999). *MadSci network*. Récupéré le 21 septembre 2005 de http://www.madsci.org/posts/archives/may99/927309210.An.r.html
23. Pidwirny, M. (2006). *Fundamentals of physical geography.* Récupéré le 23 août 2006 de http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10t.htm
24. Potash and Phosphate Institute. (Été 2006). Limiting lawn fertilizers. *Agri-Briefs.*

25. Radcliffe, D. et M. Cabrera, eds. (2007) *Modeling P in the environment*. Boca Raton, FL : CRC Press.

26. Raven, P. (2003). *The environmental challenge*. Récupéré le 27 juin 2005 de http://www.agbioworld.org

27. Le ministère de l'Environnement de l'Ontario. (2007). *Source Protection and the Great Lakes*. http://www.ene.gov.on.ca/en/water/cleanwater/cwadocs/6349.php

28. Smil, V. (2004). *Enriching the earth*. Cambridge, MA : MIT Press.

29. Nations unies. (1998). *World population prospects*. New York : Auteur de New York.

30. Vitousek, P.M., J.D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger et G.D. Tilman. (1997). Human alterations of the global nitrogen cycle: Causes and consequences. Issues in *Ecology* 1.

31. Washington State University. (2005). *Physical properties of soil*. Récupéré le 22 novembre 2005 de http://www.soilstfree.wsu.edu/mg/physical.htm

Glossaire

aliments génétiquement modifiés : un produit alimentaire génétiquement modifié contenant une certaine quantité d'organismes génétiquement modifiés (OGM) comme ingrédients. Un OGM est un organisme qui a reçu un gène provenant d'autres espèces, ajouté à l'aide de la technologie de l'ADN recombiné.

ATP : adénosine triphosphate; un composé qui possède trois groupements phosphate et qui est utilisé par les cellules pour emmagasiner de l'énergie.

carence en nutriments : une condition où la quantité d'un nutriment essentiel à la santé d'un organisme est insuffisante.

cultures : les cultures vivrières, gazons, jardins et plantes ornementales, telles que des fleurs.

cultures de couverture : des cultures telles que le seigle, la luzerne et le trèfle qui peuvent être plantées immédiatement après une récolte pour maintenir le sol en place, prévenant ainsi l'érosion et les pertes de nutriments. Elles représentent aussi un type important d'engrais parce qu'elles offrent une valeur nutritive lorsqu'elles sont éventuellement labourées dans le sol. Ces engrais à base de plantes sont utilisés à petite échelle par rapport aux engrais à base de fumier.

diffusion : le déplacement vers le bas d'une substance selon son gradient de concentration, à partir d'une zone à forte concentration jusqu'à une zone à plus faible concentration.

engrais commercial : un mélange préparé commercialement de nutriments pour végétaux comprenant de l'azote, du phosphore et du potassium que l'on applique sur le sol pour rétablir la fertilité et accroître le rendement des cultures. Les engrais commerciaux contiennent des nutriments en quantités déterminées que les plantes peuvent assimiler aussitôt appliqués. Un autre nom pour ce type d'engrais est un engrais inorganique.

engrais inorganique : (voir engrais commercial ci-haut)

engrais organique : un engrais qui subit peu ou aucun traitement et qui est dérivé des matières végétales et animales. Parfoid, des sources minérales non traitées sont aussi appelées organiques.

fixation de l'azote : un processus biologique ou chimique par lequel l'azote élémentaire que l'on trouve dans l'air est converti en azote organique ou azote assimilable par les plantes.

gradient de concentration : une variation, sur une distance, de la concentration de certaines molécules.

infiltration : un processus par lequel l'eau à la surface du sol est introduite dans le sol.

lignine : un polymère non glucidique qui relie les fibres les unes aux autres. Il ajoute de la force et de la rigidité aux parois végétales de la plante.

loam : un sol riche constitué d'un mélange de sable et d'argile et de matières organiques en décomposition.

macroélément : un nutriment qui doit être présent en une quantité relativement élevée pour assurer la santé de l'organisme. Les macroéléments servent à constituer des biomolécules essentielles.

micro-organismes : un organisme trop petit pour être visible à l'oeil nu sans aide technologique. Une bactérie est un type important de micro-organisme.

nutriment : un des 17 minéraux essentiels et non essentiels nécessaires à la croissance des plantes.

oligo-élément : un nutriment dont la présence à l'état de trace est nécessaire pour assurer la santé de l'organisme. Les oligo-éléments sont souvent utilisés comme co-enzymes pour faciliter les réactions enzymatiques.

percolation : le processus par lequel l'eau se déplace vers le bas à travers des ouvertures dans le sol.

perméabilité : la capacité du sol à permettre le passage de l'eau.

phloème : une partie du système vasculaire des plantes, constituée de cellules vivantes disposées dans des tubes qui acheminent les sucres et autres nutriments organiques dans toutes les parties de la plante.

pollution par les nutriments : la présence en quantités excessives de nutriments tels que l'azote et le phosphore dans les cours d'eau. Ces nutriments favorisent la croissance d'algues, ce qui épuise l'oxygène dans l'eau et étouffe certains organismes aquatiques. La pollution par les nutriments provient de sources naturelles et de sources imputables à l'homme.

porosité : le pourcentage par unité de volume dans le sol qui n'est pas occupé par des solides.

Révolution verte : un terme utilisé pour décrire la transformation de l'agriculture dans certains pays en développement entre les années 1940 et 1960, developpé par le gagnant du Prix Nobel scientifique Dr. Norman Borlaug. Au cours de la Révolution verte, les technologies déjà existantes comme les pesticides, l'irrigation et l'utilisation d'engrais inorganiques se sont propagées dans les pays en développement, ce qui a entraîné une augmentation du rendement des cultures.

source diffuse : la pollution par les nutriments qui résulte du ruissellement et qui s'infiltre dans le sol, les eaux souterraines et les océans et qui provient d'activités étendues et éloignées. Puisqu'elle provient d'un certain nombre de sources différentes, une source diffuse est plus difficile à localiser, à quantifier et à retracer qu'une source ponctuelle de pollution par les nutriments.

source ponctuelle : la pollution par les nutriments provenant d'une source précise qui peut être identifiée, tels une usine ou un centre d'épuration.

toxicité des nutriments : la présence d'une quantité excessive d'un nutriment en particulier, ce qui est nocif pour l'organisme.

transpiration : un processus par lequel une plante perd de l'eau dans l'air à travers les stomates de ses feuilles.

transport actif : le déplacement d'une substance à travers la membrane biologique selon son gradient de concentration, soit à partir d'une zone à faible concentration jusqu'à une zone à plus forte concentration. Le transport actif nécessite en apport en énergie et l'utilisation de protéines de transport spécifiques.

xylème : des tissus conducteurs qui transportent l'eau et les nutriments et dissolvent les nutriments dans les plantes vasculaires.