



550, rue Sherbrooke Ouest, bureau 100
Montréal (Québec) H3A 1B9
Tél. : 514 840-1234; Téléc. : 514 840-1244
Place de la Cité – Tour de la Cité
2600, boul. Laurier, bureau 625
Québec (Québec) G1V 2W1
Tél. : 418 648-8080; téléc. : 418 648-8141
<http://www.crim.ca>



CRIM - Documentation/Communications

Rapport de veille technologique

**Le rôle des technologies de l'imagerie
dans le secteur de l'environnement**

CRIM-08-02-18

**Valérie Gouaillier, M.Sc.
Langis Gagnon, Ph. D.**

**Département de R-D
Équipe Vision et imagerie**

Octobre 2007 (révision Janvier 2008)

**ISBN-13 : 978-2-89522-103-6
ISBN-10 : 2-89522-103-0**



Pour tout renseignement, communiquer avec :

CRIM Centre de documentation

CRIM

550, rue Sherbrooke Ouest, bureau 100

Montréal (Québec) H3A 1B9

Téléphone : (514) 840-1234

Télécopieur : (514) 840-1244

Tous droits réservés © 2007 CRIM

ISBN-13 : 978-2-89522-103-6

ISBN-10 2-89522-103-0

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2007

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2007

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ EXÉCUTIF	5
INTRODUCTION	6
REMERCIEMENTS	7
1. DESCRIPTION DU SECTEUR DE L'ENVIRONNEMENT	8
1.1 Définition du secteur de l'environnement	8
1.2 Segments du secteur	8
1.3 Applications environnementales pour les technologies d'imagerie	9
1.3.1 Observation de la Terre	10
1.3.2 Tri des matières résiduelles	16
1.3.3 Analyses environnementales en laboratoire	17
1.3.4 Analyses paysagères et planification environnementale.....	19
2. TECHNOLOGIES D'IMAGERIE APPLIQUÉES À L'ENVIRONNEMENT	22
2.1 Notions de base sur les technologies d'imagerie	22
2.1.1 Capteurs.....	22
2.1.2 Traitements et analyses numériques	23
2.2 Imagerie pour l'observation de la Terre	24
2.2.1 Capteurs optiques	26
2.2.2 Capteurs radars	27
2.2.3 Lidar	28
2.2.4 Imagerie thermique	28
2.2.5 Photographie.....	29
2.2.6 Logiciels	29
2.3 Visionique pour le tri des matières résiduelles	30
2.3.1 Imagerie couleur et imagerie spectrale	30
2.3.2 Exemples de systèmes de tri optique.....	32
2.4 Imagerie pour les analyses environnementales en laboratoire	34
2.4.1 Microscopie.....	34
2.4.2 Cytométrie en flux et cytométrie par imagerie	37
2.4.3 Scanographie	37

2.4.4	Images thermiques.....	38
2.5	Composition et synthèse d'image pour l'analyse paysagère.....	38
2.5.1	Photomontage.....	39
2.5.2	Conception assistée par ordinateur (CAO)	39
2.5.3	Bloc-diagramme	39
2.5.4	Réalité virtuelle.....	39
2.5.5	Réalité augmentée	40
2.5.6	Exemples de systèmes d'imagerie expérimentaux pour l'analyse paysagère	41
3.	ENJEUX ET DEFIS	42
3.1	Observation de la Terre	42
3.2	Tri des matières résiduelles	45
3.3	Analyses environnementales en laboratoire	46
3.4	Analyses paysagères et planification environnementale	47
4.	QUELQUES DONNEES DE MARCHÉ	49
	BIBLIOGRAPHIE	54
	ANNEXE – LE MILIEU	62

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Ce rapport de veille technologique brosse un tableau du rôle des technologies de l'imagerie dans le secteur de l'environnement. Il recense différentes technologies d'imagerie pour l'observation, l'analyse, le suivi et la prédiction de phénomènes touchant à l'environnement, et énonce des enjeux et défis liés à ces technologies tels que perçus par 15 experts externes.

Le rapport se concentre sur quatre grandes catégories d'applications environnementales de l'imagerie : (1) observation de la Terre, (2) tri automatisé des matières résiduelles, (3) analyse environnementale en laboratoire et (4) analyse paysagère.

Les technologies d'imagerie pour l'observation de la Terre sont utilisées notamment pour analyser et cartographier les différents éléments de la couverture terrestre, suivre l'aménagement du territoire, différencier les espèces végétales, à analyser les types de sol, identifier l'état des différents systèmes naturels (pollution des eaux, santé des cultures, déboisement, etc.), suivre et prédire l'évolution de phénomènes environnementaux dans le temps (climat, catastrophes naturelles).

Le tri automatisé des matières résiduelles est un marché croissant pour les technologies de visionique. Les systèmes de visionique sont de plus en plus utilisés pour le tri du plastique, du verre, du papier et de l'aluminium. Cependant, ils sont encore peu employés dans le recyclage des déchets électroniques et des matériaux de construction ou de démolition.

Les technologies d'imagerie les plus communément utilisées pour l'analyse environnementale en laboratoire touchent à la microscopie, la cytométrie, la scanographie et l'imagerie thermique. Une grande partie du travail d'analyse visuelle se fait encore par des humains. Le recours aux logiciels d'imagerie de microscopie semble plus fréquent dans les laboratoires de recherche que dans ceux menant des analyses microbiologiques courantes de qualité de l'eau, de l'air, du sol et des analyses de matières résiduelles.

Les technologies d'imagerie appliquées à l'analyse de paysages et la planification environnementale touchent principalement à la composition et la synthèse d'images. On y retrouve les logiciels de photomontage, de représentation géomatique, de conception assistée par ordinateur (CAO), de création de blocs-diagrammes, de réalité virtuelle et de réalité augmentée. Toutefois, ces techniques reçoivent des niveaux différents d'adoption. L'informatique paysagère est plus répandue pour traiter les dimensions objectives du paysage (e.g. géomorphologie) que ses aspects subjectifs et émotifs.

Évaluée à plus de 29 milliards de dollars, l'industrie canadienne de l'environnement représente près de 8 000 entreprises dont la valeur des exportations annuelles se chiffre à plus de 1,4 milliard de dollars. 93% de ces entreprises compte moins de 100 employés. 21% des entreprises canadiennes en environnement se retrouvent au Québec.

INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux occupent une place grandissante dans les préoccupations des pays industrialisés et de leurs populations. Changements climatiques, catastrophes naturelles, contamination des eaux, énergies renouvelables deviennent des thèmes récurrents dans les débats sociaux et politiques. Les sociétés modernes prennent conscience de leur impact sur l'environnement et, à l'inverse, de l'impact des phénomènes environnementaux sur leur vie.

Depuis plusieurs années, les problématiques environnementales ont amené plusieurs pays à adopter des lois et politiques visant à protéger l'environnement et à contrôler la pollution. Ces mesures ont entraîné l'émergence d'une industrie de produits et services environnementaux. Des nouvelles technologies environnementales ont vu le jour. Aujourd'hui, avec la signature de traités internationaux, tels que le protocole de Kyoto, et les objectifs de développement durable, le secteur de l'environnement devrait croître et ouvrir de nouveaux marchés à l'échelle mondiale.

Dans ce contexte, le CRIM, centre de recherche spécialisé en technologies de l'information, se soucie de connaître la contribution que celles-ci peuvent amener aux applications environnementales. Le présent rapport de veille technologique vise donc à étudier la question pour l'un des thèmes de recherche et développement du CRIM : la vision et l'imagerie par ordinateur. Il tente de cerner le rôle que jouent les technologies de l'imagerie dans le secteur de l'environnement, plus particulièrement au Québec.

Ce rapport s'adresse à un large public. Il a été mené sur trois mois, basé sur une revue documentaire du sujet et d'une consultation auprès de 15 experts. Il vise à dresser un portrait sommaire des applications technologiques de l'imagerie en environnement. Sans prétendre être exhaustif, le rapport recense différentes technologies basées sur l'acquisition, le traitement et l'analyse d'images pour effectuer des opérations d'observation, d'analyse, de suivi et de prédiction de phénomènes touchant à l'environnement. Il représente une première exploration du potentiel, des tendances et des défis de l'utilisation de ces technologies pour ce secteur. Les données recueillies sont regroupées en quatre chapitres :

- description de quatre catégories d'applications environnementales pour l'imagerie ;
- description des technologies pour ces secteurs ;
- enjeux et défis liés à ces technologies ;
- données de marché.

En complément, nous donnons en annexe une liste de centres de recherches, organisations et entreprises impliqués dans les quatre secteurs applicatifs ci-dessus.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les personnes suivantes pour leur chaleureuse et inestimable contribution.

Jean-François Bédard, M. Sc. , conseiller en technologies de l'information Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE)
Monique Bernier, Ph. D. , chercheure-professeure Centre eau, terre et environnement Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Goze Bertin-Bénié, Ph. D. , directeur Département de géomatique appliquée Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) Université de Sherbrooke
Pauline Brousseau, Ph. D. Institut Armand-Frappier Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Alain Coulombe , chargé de projets en géomatique et télédétection Direction générale de l'information géographique Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF)
Daniel Cyr, Ph. D. , professeur associé Institut Armand-Frappier Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Camille Desmarais , conseiller en aménagement et développement rural Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPA)
Normand Gadoury, ing. , directeur de projets Enviro-Accès Inc.
Claude Lafond , conseiller en développement industriel - Secteur spatial Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE)
Claude Laliberté , directeur Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs (MDDEP)
John Luong, Ph. D. , chef de groupe biocapteurs et nanobiotechnologies Institut de recherche en biotechnologie (IRB) Conseil national de recherches du Canada (CNRC)
Aubert R. Michaud, Ph. D. , chercheur Conservation des sols et de l'eau Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
Philippe Poullaouec-Gonidec, Ph. D. , titulaire Chaire UNESCO en paysage et environnement de l'Université de Montréal (CUPEUM) Université de Montréal
Stéphane Prémont, M. Sc. , responsable des laboratoires Institut national de la recherche scientifique (INRS)
Benoît Saint-Onge, Ph. D. , professeur Département de géographie Groupe d'études interdisciplinaires en géographie et environnement régional (GEIGER) Université du Québec à Montréal (UQAM)

1. DESCRIPTION DU SECTEUR DE L'ENVIRONNEMENT

1.1 Définition du secteur de l'environnement

L'environnement peut être défini comme « l'ensemble des conditions naturelles (biologiques, physiques et géographiques) et des conditions découlant de l'aménagement du territoire qui agissent sur les organismes vivants, tels que les plantes, les animaux et les humains »¹.

Le Ministère du Développement économique, de l'innovation et de l'exportation (MDEIE) dans son document *La filière industrielle de l'environnement au Québec, 2003*², définit l'industrie de l'environnement comme l'ensemble des biens et services qui vise l'analyse, la prévention, la réduction et la correction des atteintes à l'environnement. Celles-ci incluent la pollution de l'eau, de l'air et du sol, mais aussi tous les problèmes liés aux matières résiduelles, aux bruits, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Cette industrie comprend également les technologies qui réduisent les risques pour l'environnement, minimisent les déchets et les émissions et économisent les ressources ainsi que l'énergie.

Cette définition axée sur l'utilisation finale des biens et services à des applications environnementales rejoint celle utilisée par Statistique Canada³, ainsi que par Eurostat et l'OCDE⁴.

En plus d'englober les biens, les services et les technologies liés aux atteintes environnementales, tels que décrits ci-dessus, le présent rapport étendra la définition du secteur de l'environnement à toute activité de suivi, d'analyse, d'étude et de contrôle de l'environnement, autant à des fins de recherches académiques que commerciales, touchant à la connaissance, la protection et l'amélioration de l'environnement..

1.2 Segments du secteur

Les applications environnementales étant nombreuses et diverses, elles engendrent une vaste gamme d'activités commerciales qui chevauchent plusieurs secteurs économiques. Le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)⁵ n'attribue

¹ <http://www.mddep.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/glossaire.htm>.

² http://www.mdeie.gouv.qc.ca/page/web/portail/entreprises/service.prt?svcid=PUBLICATIONS1&page=details_publication.jsp&iddoc=43870.

³ Statistique Canada. Industrie de l'environnement, secteur des entreprises, catalogue no 16F0008XIF, 2000.

⁴ L'Industrie des biens et services environnementaux : manuel de collecte et d'analyse des données, OCDE, Paris, 1999.

⁵ http://www.statcan.ca/francais/Subjects/Standard/naics/2002/naics02-menu_f.htm.

aucune classe distincte à l'industrie de l'environnement; ce secteur chevauche donc plusieurs classes du SCIAN.

Statistique Canada divise les activités de cette industrie en trois catégories : (1) biens environnementaux, (2) services environnementaux et (3) construction liée à l'environnement. Le présent rapport propose plutôt une subdivision en termes des composantes environnementales auxquelles les activités s'appliquent, qu'il s'agisse indifféremment de biens, de services ou de construction :

- air ;
- eau ;
- sol ;
- végétation/foresterie ;
- faune ;
- climat ;
- agriculture ;
- aménagement du territoire ;
- paysage.

On peut évidemment taxer ce découpage d'arbitraire puisque la plupart de ces segments sont interreliés. En effet, l'agriculture touche à la fois aux végétaux, au sol, à l'eau et à l'aménagement du territoire. La forêt, composante végétale, dépend à la fois des propriétés du sol et de son irrigation, mais elle joue aussi un rôle primordial dans les changements climatiques par sa capacité à capter le dioxyde de carbone. Cependant, la nouvelle division proposée est mieux adaptée au but que nous nous sommes fixé; on y retrouve, entre autres, les différents systèmes naturels, ainsi que les éléments découlant de l'aménagement du territoire et de l'activité humaine.

1.3 Applications environnementales pour les technologies d'imagerie

En environnement, comme dans d'autres domaines, les technologies d'imagerie sont utilisées pour recueillir de l'information sur différents objets, milieux ou phénomènes. Une image permet de visualiser ce qui est observé, qu'il s'agisse d'un vaste territoire ou d'un micro-organisme. Ainsi, les technologies d'imagerie s'utilisent à différentes échelles d'observation (planète, territoire, laboratoire) et pour une variété d'applications.

De plus, le traitement informatique des images permet d'automatiser l'analyse et l'interprétation visuelles des données recueillies. Par exemple, l'inspection visuelle par ordinateur des chaînes de production manufacturière est maintenant très répandue. En outre, les technologies d'imagerie peuvent être déployées dans des endroits impraticables

ou dangereux pour l'humain. C'est notamment le cas de l'imagerie satellitaire qui rend possible la surveillance des phénomènes environnementaux depuis l'espace ou l'imagerie miniaturisée pour l'inspection des tuyaux d'égouts.

Les applications environnementales des technologies d'imagerie sont si nombreuses qu'il serait difficile d'en fournir un inventaire exhaustif. La présente section tentera toutefois d'en répertorier les principales.

À la suite de cette étude, quatre grandes catégories de technologies d'imagerie appliquées au secteur de l'environnement ont été identifiées :

1. Les technologies d'imagerie pour l'observation de la Terre.
2. Les technologies de visionique pour le tri automatisé des matières résiduelles.
3. Les technologies d'imagerie pour les analyses environnementales en laboratoire.
4. Les technologies de visualisation pour les analyses paysagères et la planification environnementale.

Les sous-sections suivantes présenteront quelques applications environnementales pour chaque catégorie énumérée ci-dessus. Les technologies d'imagerie utilisées pour chacune de ces applications sont présentées plus en détail dans la section 2.

1.3.1 Observation de la Terre

Cette catégorie regroupe les **technologies d'imagerie satellitaire et aérienne**. Celles-ci appartiennent au domaine de la télédétection qui consiste à obtenir, à distance, des informations sur la surface de la Terre et sur l'atmosphère.

Offrant une vue de la Terre du haut des airs ou de l'espace, elles ouvrent donc la voie à des analyses de l'environnement qui sont difficiles, voire impossibles, à mener au sol. Ainsi, ces technologies permettent d'observer, d'étudier et de suivre des phénomènes environnementaux sur des portions plus ou moins grandes de territoire (variant d'un mètre à plusieurs kilomètres). Souvent combinées à des études de terrain, elles touchent les applications nécessitant l'acquisition de données pour la protection de l'environnement et la gestion du territoire et de ses ressources, autant dans les milieux naturels qu'anthropisés.

Non seulement, les systèmes imageurs utilisés pour l'observation de la Terre permettent de visualiser le territoire et ses propriétés géographiques, mais leurs différentes sensibilités électromagnétiques révèlent aussi diverses propriétés biologiques, physiques et structurelles des éléments naturels qui s'y trouvent.

De façon générale, les images satellitaires et aériennes servent notamment à analyser et cartographier les différents éléments de la couverture terrestre, à suivre l'aménagement du territoire, à différencier les espèces végétales, à analyser les types de sol, à identifier l'état

des différents systèmes naturels (pollution des eaux, santé des cultures, déboisement, etc.), à suivre et prédire l'évolution de phénomènes environnementaux dans le temps (climat, catastrophes naturelles). Elles s'utilisent donc dans presque tous les segments du secteur de l'environnement⁶.

AIR

Les autorités responsables des zones urbaines et leurs populations des zones urbaines se préoccupent de plus en plus de la qualité de l'air. Celle-ci dépend de multiples facteurs géophysiques, tels que les vents, la stabilité de l'atmosphère ou la topographie locale. Le suivi, sur de grandes régions, de polluants atmosphériques (dioxyde et monoxyde de carbone, oxydes d'azote, ozone, poussière, etc.), nécessite donc l'utilisation de systèmes de mesures à grande échelle. Les techniques de télédétection constituent un outil précieux pour l'étude de la pollution atmosphérique. Elles contribuent notamment à :

- l'observation des aérosols⁷ ;
- la cartographie de la rugosité aérodynamique⁸ ;
- l'estimation de la concentration des polluants ;
- la modélisation de la dispersion des polluants.

EAU

L'eau représente un enjeu majeur, tant sur le plan environnemental qu'économique. Par conséquent, qu'elle soit à la surface ou dans le sol, ou qu'il s'agisse de glace, l'eau sur un territoire fait l'objet d'analyses multiples. Par exemple, la présence d'eau, sa qualité, ainsi que son écoulement sur le terrain auront des répercussions importantes autant sur les cultures, que les forêts et les populations. Dans un pays comme le Canada, l'étude des glaces recèle plusieurs enjeux : prévision des embâcles, effets sur le débit des rivières, sécurité des voies de communication hivernales pour les peuples autochtones et la navigation, suivi des changements climatiques, souveraineté dans l'Arctique. En télédétection, les différents capteurs imageurs permettent d'évaluer la répartition spatiale et la dynamique des phénomènes hydrologiques. Quelques-unes de leurs applications sont :

- la cartographie et la modélisation des bassins hydrologiques ;
- la cartographie et la surveillance des marécages ;
- la détection des changements dans les rivières et les deltas ;

⁶ Une grande partie des applications énumérées dans cette section pour les différents segments environnementaux sont tirées de http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter5/01_f.php.

⁷ Aérosols : particules à l'état liquide (brouillard) ou solide (fumée) en suspension dans l'air.

⁸ Rugosité aérodynamique : ensemble des effets que peut avoir le sol sur le régime d'écoulement des vents. Définition tirée de <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/68/84/PDF/chap1.pdf>.

- la surveillance et la cartographie des inondations ;
- la surveillance et la cartographie de l'étendue d'une surface de neige ;
- la mesure de l'épaisseur de la neige ;
- la surveillance de la glace océanique, fluviale, lacustre et de rivière ;
- la surveillance de la dynamique des glaciers ;
- la détection des fuites des canaux d'irrigation ;
- la planification des horaires d'irrigation ;
- l'élaboration de modèles d'écoulement.

SOL

L'imagerie par télédétection permet d'analyser différents attributs des sols : topographie, structure, rugosité, composition (minéralogique, organique, chimique), humidité. Elle offre l'avantage, sur les méthodes d'analyse directes au sol, de permettre un suivi régional de façon rapide. Elle trouve des applications dans plusieurs secteurs intimement liés à l'environnement, comme l'agriculture et la géologie.

Parmi les applications de la télédétection à l'analyse du sol, on retrouve :

- la cartographie topographique ;
- la cartographie lithologique (roches) ;
- la cartographie structurale (interprétation des mouvements de la croûte terrestre) ;
- la surveillance et prédiction des mouvements de terrain (érosion et subsidences) ;
- l'exploration pour l'exploitation des ressources naturelles (pétrole, minerais) ;
- la cartographie et surveillance des taux de sédimentation ;
- la cartographie des risques géologiques ;
- la cartographie et surveillance des phénomènes naturels ;
- la détection de polluants⁹ ;
- les modèles de drainage et d'écoulement.

VEGETATION/FORESTERIE

Les images générées par les différents systèmes de télédétection permettent d'identifier les espèces végétales et d'en évaluer leur état de santé. Elles sont donc abondamment utilisées

⁹ <http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/70/2/393>.

pour la surveillance de la végétation et, en particulier, des forêts. Au Québec, la forêt constitue à la fois une ressource naturelle majeure pour l'économie, un habitat écologique et un puissant capteur de dioxyde de carbone (CO₂). Elle fait l'objet d'une importante surveillance environnementale, puisque le déboisement, de sources naturelles ou humaines, a un impact à long terme sur le climat, la conservation du sol, la biodiversité et les régimes hydrologiques. La gestion forestière est donc l'un des domaines applicatifs les plus actifs des technologies de télédétection¹⁰. Celles-ci s'utilisent notamment pour :

- la cartographie forestière ;
- le dénombrement et l'inventaire forestier, afin d'assurer un aménagement durable (équilibre entre l'exploitation commerciale et la préservation de la biodiversité) ;
- l'évaluation de la biomasse forestière ;
- la surveillance de l'état de santé et de la croissance ;
- la surveillance des perturbations majeures (feux, coupes, insectes, etc.) ;
- la surveillance du déboisement de sources naturelles (feux, infestations d'insectes, sécheresses, agrandissement des déserts, perte d'eau souterraine, maladie, typhon) ou humaines (coupe à blanc, brûlis, expansion de l'agriculture) ;
- l'estimation du bilan carbone actuel et futur (capacité de captage du CO₂ par rapport l'émission de ce gaz);
- l'étude de la dynamique des forêts en fonction de facteurs environnementaux (sites de drainage, type de sol, facteurs climatiques, aspects écosystémiques).

FAUNE

L'étude et la gestion de la faune par télédétection reposent principalement sur l'analyse des ressources naturelles dont dépendent les animaux. Par exemple, l'approvisionnement en eau et en végétaux a une influence majeure sur les populations animales. Celles-ci subissent aussi l'impact des changements climatiques. D'autres sections de ce rapport traitent de l'observation des phénomènes liés à ces segments de l'environnement. Entre autres applications de l'imagerie aérienne ou satellitaire spécifiques à la surveillance faunique, l'on retrouve :

- le suivi des espèces migratrices¹¹ ;
- l'observation des habitats terrestres ou marins et suivis de leur état de santé¹² ;

¹⁰ Exemple de projet réalisé au Québec : Observation de la Terre pour le développement durable des forêts (OTDD) mené par le Centre de foresterie des Laurentides (CFL) du Service canadien des forêts (SCF) afin de produire une nouvelle carte satellitaire de la couverture terrestre du Québec forestier.
<http://www.quebecgeographique.gouv.qc.ca/approfondir/bibliotheque/geoinfo/geoinfo-fevrier-2007.asp>.

¹¹ <http://www.espacepourlesespeces.ca/technologiesspatiales/index.htm>.

- le dénombrement des populations animales¹³ ;
- la localisation des animaux¹⁴.

CLIMAT

La météorologie a été l'une des premières applications civiles de la télédétection. Les nombreux capteurs imageurs météo, principalement optiques et radars, saisissent fréquemment, le jour comme la nuit, des données sur l'atmosphère et la surface de la Terre. Ils renseignent notamment sur les formations nuageuses, desquelles peuvent être inférées la structure et l'évolution des perturbations atmosphériques. Ils mesurent aussi des paramètres de température et d'humidité. Toutes ces informations permettent de prédire les conditions météorologiques à la grandeur du globe.

De surcroît, les images produites par les systèmes de télédétection servent à l'analyse du climat en général et des changements qu'il subit. Par exemple, le suivi dans le temps des zones chaudes et froides sur la planète, de la température des océans, des glaces et des neiges, des écosystèmes, permet d'attester des changements liés au climat. L'observation de la Terre par télédétection intervient autant dans l'identification des causes que des effets des changements climatiques.

Plus précisément, s'y retrouvent les applications suivantes :

- la cartographie des nuages ;
- la mesure de la température des nuages, de la surface du sol ou de la mer ;
- l'évaluation de l'état de l'eau dans les nuages (liquide ou glace) et de la dimension des gouttes d'eau ou cristaux de glace ;
- l'analyse de la morphologie des nuages (épaisseur, régularité de surface) ;
- la mesure de l'humidité atmosphérique ;
- l'étude du profil des vents ;
- la mesure des précipitations ;
- le suivi du mouvement des masses atmosphériques ;
- l'identification des zones chaudes et froides ;
- l'étude des changements climatiques.

¹² <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0355F/T0355F07.htm>

¹³ http://www.idrc.ca/fr/ev-5569-201-1-DO_TOPIC.html

¹⁴ Un exemple de projet au Québec : les images Landsat ont servi à détecter le lichen dont se nourrissent les caribous pour réaliser la cartographie de ces populations animales.
<http://www.quebecgeographique.gouv.qc.ca/approfondir/bibliotheque/geoinfo/pdf/juin02.pdf>

AGRICULTURE

Le rôle économique crucial de l'agriculture, ainsi que l'importance de ses impacts environnementaux, font de l'agriculture un domaine majeur pour l'application des technologies de télédétection. En agriculture, les images satellitaires et aériennes servent à suivre les cultures de l'ensemencement jusqu'à la récolte. Leur utilisation vise deux grands objectifs : l'amélioration des rendements agricoles et les évaluations agro-environnementales¹⁵.

À moyenne résolution, elles permettent une observation d'ensemble des activités agricoles. Par exemple, la cartographie des cultures sur des régions étendues pourra se faire à partir d'images satellitaires.

À haute résolution, ces techniques d'imagerie renseignent sur les caractéristiques propres à chaque parcelle et sur leur variabilité spatiale et temporelle. Il s'agit alors d'agriculture de précision, une nouvelle forme d'agriculture qui vise à suivre les cultures et à adapter les interventions (ensemencement, fertilisation, etc.) selon les propriétés de chaque portion de terre cultivée, afin d'en maximiser le rendement. Des paramètres tels que la texture du sol, l'indice d'humidité, l'indice de végétation, la teneur en nutriments, l'état de santé des végétaux, seront mesurés, idéalement jusqu'au mètre près. L'imagerie aérienne ou les capteurs sur de la machinerie au sol sont les plus souvent utilisés pour recueillir ces données.

En agriculture, les technologies d'imagerie s'utilisent notamment pour :

- classer les types de cultures ;
- évaluer la biomasse des cultures ;
- évaluer la santé de celles-ci ;
- évaluer les dégâts causés aux cultures par les intempéries (gel, sécheresse, inondation) ;
- estimer la production totale d'une récolte ;
- cartographier les caractéristiques du sol (humidité, drainage, fertilité, etc.) et les pratiques de gestion de celui-ci ;
- l'agriculture de précision ;
- les diagnostics agroenvironnementaux ;
- surveiller la conformité aux lois et traités¹⁶.

¹⁵ L'agroenvironnement est la discipline qui étudie les impacts de l'agriculture sur l'environnement.

¹⁶ http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter5/02_f.php.

1.3.2 Tri des matières résiduelles

La gestion des matières résiduelles représente un problème environnemental majeur pour nos sociétés. De plus en plus de déchets sont produits, tandis que les espaces d'enfouissement sont restreints. Les dépotoirs ont des impacts néfastes sur l'environnement (gaz, odeurs, contamination des nappes phréatiques). Dans ce contexte, les déchets comportent un coût écologique et économique élevé.

Le recyclage des matières résiduelles s'avère donc nécessaire et représente un secteur environnemental prometteur. Il permet de préserver les ressources naturelles, diminuer les déchets à enfouir ou à incinérer, sauver de l'énergie et réduire l'émission de gaz à effet de serre. En effet :

- une étude commandée par le Waste & Resources Action Programme (WRAP)¹⁷, une entreprise britannique à but non lucratif qui fait la promotion du recyclage et développe des marchés pour les matières recyclées a démontré que, dans 83% des scénarios de traitement des déchets, le recyclage s'avérait moins dommageable pour l'environnement que l'enfouissement ou l'incinération¹⁸ ;
- l'étude du WRAP a montré que la Grande-Bretagne a réduit de 10% ses émissions de dioxyde de carbone grâce à ses opérations de recyclage. Aux États-Unis, c'est 49 millions de tonnes de CO² que le recyclage a permis de sauver en 2005 ;
- l'économie d'énergie réalisée grâce au recyclage de matières existantes est de : 95% pour l'aluminium, 70% pour les plastiques, 60% pour le fer, 40% pour le papier et 30% pour le verre¹⁹.

Auparavant, les programmes de cueillette sélective des matières recyclables exigeaient des citoyens et entreprises de séparer les différentes matières (verre, papier, plastique et métal) dans des contenants différents. Aujourd'hui, afin de simplifier la tâche à la population et l'encourager à recycler, beaucoup de municipalités récoltent les matières recyclables pêle-mêle. Le tri se fait à l'usine de recyclage. Ceci accélère la cueillette et permet de réduire le nombre de camions nécessaires pour celle-ci.

Les matières recyclées n'ayant pas toutes la même valeur, le tri ciblé est une étape primordiale du processus de récupération. Par exemple, la valeur du verre recyclé dépend de sa couleur. Les matériaux recyclables doivent donc être identifiés et séparés avec précision. De plus, la quantité et la pureté des lots produits sont des paramètres cruciaux pour la rentabilité du recyclage.

¹⁷ <http://www.wrap.org.uk/>.

¹⁸ http://www.economist.com/science/tq/displaystory.cfm?story_id=9249262.

¹⁹ http://www.economist.com/science/tq/displaystory.cfm?story_id=9249262.

Une grande partie de ce tri à l'usine de recyclage s'effectue manuellement. De manière à accélérer le processus de tri et à réduire les accidents, l'automatisation de certaines de ses étapes est souhaitable.

Les **systèmes de vision industrielle (visionique)** sont des machines couplant des capteurs à imagerie à des systèmes informatisés de traitement, afin de reproduire les capacités de perception visuelle humaine pour accomplir des tâches nécessitant une analyse visuelle²⁰. Ils sont de plus en plus utilisés pour automatiser les tâches de production, manipulation, inspection intervenant dans une variété de processus industriels. Plusieurs usines de récupération y ont recours.

Les systèmes de visionique permettent de détecter et d'identifier les matières recyclables par catégories au moyen de senseurs optiques. Les matières résiduelles défilent sur un convoyeur, puis sont identifiées et triées par type de matière recyclable grâce à la visionique. Les matières sont ensuite retirées par des aimants, des jets d'air ou des dispositifs mécaniques.

Le tri optique est une alternative profitable au tri manuel en termes de coût et d'efficacité. Il présente les avantages suivants²¹ :

- précision accrue dans l'identification des matières recyclables²² ;
- production de ballots de matières recyclées plus pures ;
- réduction du personnel affecté au tri entraînant une diminution des coûts ;
- augmentation du débit des matières triées (les systèmes de tri optique peuvent traiter de 500 à 10 000 kg par heure) ;
- réduction de la taille des équipements (les systèmes à tri optique sont plus compacts que les installations traditionnelles) ;
- adaptabilité : les systèmes de visionique peuvent être entraînés pour reconnaître de nouvelles matières.

Les systèmes de visionique sont utilisés pour le tri du plastique, du verre, du papier et de l'aluminium. Cependant, ils sont encore peu employés dans le recyclage des déchets électroniques et des matériaux de construction ou de démolition.

1.3.3 Analyses environnementales en laboratoire

Dans cette catégorie se retrouvent toutes les méthodes d'analyses biologiques, microbiologiques, toxicologiques et chimiques sur l'air, l'eau, le sol, la flore et la faune,

²⁰ Définition de visionique tirée du Grand dictionnaire terminologique, <http://www.granddictionnaire.com/>

²¹ <http://www.machinevisiononline.org/public/articles/details.cfm?id=3189>

²² Certains systèmes peuvent reconnaître des particules aussi petites que 10 mm à un taux de précision de 95%. <http://www.recyclingtoday.com/news/news.asp?ID=9957> .

mais aussi sur tous les rejets gazeux, liquides ou solides. Ces techniques analytiques visent à évaluer la qualité du milieu naturel et à vérifier la conformité à la réglementation environnementale en vigueur.

Elles vont, par exemple, inclure :

- les tests sur les eaux naturelles et résiduaires : caractéristiques physico-chimiques, présence de polluants organiques ou inorganiques, micro-organismes ;
- l'évaluation de la qualité de l'air : pollution bactériologique et fongique, aérosols, fibres ;
- l'analyse de sols et sédiments contaminés : hydrocarbures, métaux lourds, toxiques minéraux et organiques, pesticides ;
- l'analyse des boues et déchets industriels : lixiviation²³, composition chimique, composés toxiques.

Les **analyses biologiques** s'appliquent aux organismes vivants, le plus souvent microscopiques. Elles permettront, par exemple, l'identification et le dénombrement d'algues, de rotifères, de protozoaires, de débris végétaux, de grains de pollen, et de particules minérales dans les eaux souterraines ou de surface. L'identification des cyanobactéries (algues bleu-vert), dont la prolifération dans les lacs du Québec devient un problème environnemental majeur, constitue une application de ce type d'analyses. L'étude de larves animales ou la mesure de chlorophylle en sont d'autres exemples.

La recherche et le dénombrement de micro-organismes, tels que les bactéries (par ex., coliformes fécaux ou totaux, coliphages, entérocoques, salmonelles) et les spores (levures et moisissures), représentent des **analyses microbiologiques**. Celles-ci servent, le plus souvent, à déceler la pollution de l'eau (surface, souterraine, sources d'alimentation, canalisations), de l'air, des sols, et des matières rejetées (par ex., les fertilisants).

Les **analyses physicochimiques**, c'est-à-dire portant sur les propriétés physiques et chimiques (par ex., composition, ions, demande chimique en oxygène, etc.) sont les plus répandus en analyse environnementale. Ces tests en laboratoire permettent, par exemple, de mesurer des paramètres tels que la température, la conductivité ou la turbidité de l'eau. Ils serviront aussi à identifier les différents constituants chimiques, organiques ou inorganiques, d'un composé. Ces méthodes sont donc appliquées aux échantillons de tous types : eau, sol, air, déchets. Elles sont les plus répandues en analyses environnementales, surtout dans les laboratoires commerciaux.

Les **analyses toxicologiques** servent principalement à détecter des contaminants dans des échantillons environnementaux et en étudier les effets nocifs sur les organismes vivants. Elles visent aussi à évaluer le niveau de toxicité de polluants chimiques comme les

²³ Extraction par un liquide des composants solubles d'un matériau.

pesticides, les fertilisants, les métaux lourds et les rejets industriels (par ex., les hydrocarbures aromatiques polycycliques). Ces analyses seront menées pour déterminer l'état de pollution ou le risque pour les écosystèmes que représentent des sites exposés à des substances chimiques. Elles impliqueront souvent des bio essais, c'est-à-dire des tests portant sur des organismes vivants. Ces méthodes s'inscrivent dans la discipline nommée écotoxicologie.

Que ce soit pour l'identification de substances, la détection de contaminants, le contrôle de la pollution industrielle ou les études écotoxicologiques, les analyses environnementales reposent sur l'examen et la caractérisation d'échantillons gazeux, liquides ou solides, au moyen d'une panoplie de technologies instrumentales. Cependant, la plupart d'entre elles, comme les techniques de spectrométrie et de chromatographie, produisent des données qui ne sont pas rendues sous forme d'images. Elles servent principalement aux analyses physico-chimiques.

Selon les experts consultés pour cette étude, les technologies d'imagerie les plus communément utilisées pour les analyses environnementales en laboratoire touchent à la microscopie, la cytométrie²⁴ en flux et cytométrie par imagerie, la scanographie et l'imagerie thermique.

1.3.4 Analyses paysagères et planification environnementale

Outre les conditions naturelles, c'est-à-dire biologiques, physiques et géographiques, la définition de l'environnement inclut aussi les conditions d'aménagement du territoire qui ont un impact, notamment sur les humains. Le **paysage**, qu'il soit urbain, rural ou naturel, s'inscrit dans ces éléments liés à la structure et à l'organisation spatiale du milieu naturel. C'est la portion d'un espace qui s'offre à la vue²⁵. Il englobe non seulement des phénomènes écologiques, mais aussi visuels et socioculturels qui s'avèrent sensibles pour l'humain sur le plan de ses valeurs.

Ainsi, la qualité visuelle du paysage, tout comme son évolution harmonieuse avec la vocation des territoires développés et le mode de vie de la population, deviennent des préoccupations majeures dans toute planification environnementale. Offrant aussi un grand potentiel économique pour plusieurs industries, dont celle du tourisme, la préservation et la valorisation du paysage impliquent des analyses systématiques.

L'étude paysagère décortique une perception et une interprétation d'une réalité physique. En effet, elle touche trois dimensions du paysage²⁶ :

²⁴ Approche analytique in situ qui ne nécessite pas la séparation des molécules détectées et mesurées et permet l'analyse simultanée de plusieurs constituants d'une même cellule.

²⁵ <http://www.enfa.fr/agri-culture/Ressources/articles/mediation/Michelin-Paysage.htm>.

²⁶ Selon Y. Michelin (cité dans [JALL06]).

- la dimension objective : le paysage est un objet, une réalité ;
- la dimension sensible : l'appréciation du paysage passe par une perception, un point de vue de l'observateur ;
- l'interprétation : le paysage est conceptualisé par l'esprit en fonction de la culture, de l'âge et du vécu de l'observateur.

Selon T. Joliveau (cité dans [JALL06]), la démarche paysagère s'effectue à quatre échelles spatio-temporelles :

- le *projet paysager* ou la conception de formes et d'objets paysagers nouveaux ;
- le *paysage projet* ou l'évaluation de l'impact visuel d'un équipement (autoroutes, éoliennes, lignes de transport électrique, bâtiments) ;
- le *paysage d'aménagement* ou le paysage comme moyen et finalité d'organisation spatiale à l'échelle d'une ville ou d'une région ;
- le *paysage de territoire* ou le paysage comme moyen d'analyse et de réflexion sur l'aménagement d'un territoire (échelle d'un pays, d'une province, d'une ville).

Certaines technologies d'imagerie sont utilisées pour ces analyses paysagères. Elles permettent d'abord de capter différents points de vue sur le paysage, par exemple, par la prise de photos ou de vidéos sur le terrain. Puis, elles contribuent à l'interprétation visuelle et au suivi des changements dans le temps. Elles servent aussi d'outils de visualisation des modifications projetées sur le paysage, notamment grâce aux techniques de montage photo, de modélisation 3D et de synthèse d'images. Toutefois, les technologies d'imagerie couramment appliquées à ce domaine sont souvent peu avancées, l'utilisation de logiciels de traitement et d'analyse d'images très rudimentaire et l'automatisation des processus d'analyse presque inexistant. Une grande partie de la représentation graphique utilisée reste encore la photo ou le croquis et, malgré leur essor dans d'autres domaines, les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée ne sont qu'en utilisation expérimentale dans la démarche paysagère.

L'imagerie intervient principalement dans trois grands types d'analyses paysagères pour l'aménagement et le suivi du territoire : l'analyse des structures spatiales, l'étude qualitative du paysage et les analyses prospectives.

L'analyse des structures spatiales vise les formes du relief, les textures de la végétation, les structures d'organisation (par ex., voirie, limites parcellaires, cours d'eau) et les objets paysagers (par ex., arbres isolés, murets de terrasse, clôture, édifices). Elle recoupe certaines analyses environnementales effectuées par télédétection (voir 1.3.1). Les images satellitaires et aériennes, ainsi que les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent y être appliqués, par exemple, pour déterminer les modèles numériques de terrain ou dresser la cartographie de la végétation et de l'occupation du sol.

L'étude qualitative consiste à interpréter et caractériser le paysage selon des critères de structure, d'organisation, d'esthétisme, d'ambiance, d'évocation scénique. Principalement l'œuvre d'experts, elle sert à déterminer l'intérêt visuel d'un paysage, d'en estimer le potentiel ou de suivre son évolution. Elle intervient notamment pour la valorisation de sites à des fins touristiques, culturelles ou patrimoniales. L'imagerie sert de support graphique pour ce type d'étude et de moyen d'échanges et de communication entre les experts.

Les **analyses prospectives** consistent à mesurer l'impact visuel de l'aménagement d'un territoire. Elles s'effectuent en analysant le site avant la transformation et en visualisant les résultats des politiques d'aménagement envisagées. L'évaluation de l'impact repose sur la perception de l'ensemble des changements, positifs ou négatifs, opérés sur l'environnement, souvent à long terme (10 à 20 ans).

Les analyses prospectives interviennent à la fois à l'étape de conception de projets d'aménagement, afin d'y intégrer la perception paysagère, et dans le processus de validation de ces projets auprès des clients et de la population. Elles sont fréquemment utilisées dans les domaines de l'énergie, du transport, de la foresterie et de la réhabilitation de sites industriels. Par exemple, la plupart des projets majeurs d'implantation de nouvelles infrastructures ou d'équipements doivent être soumis à l'approbation d'experts en environnement et à la population. Ceux-ci devront se prononcer sur les scénarios prospectifs présentés. Différentes techniques de représentation et de rendu visuels servent à montrer le résultat des transformations proposées. Les plus utilisées restent encore le photomontage, la conception assistée par ordinateur (CAO) et le croquis. La synthèse d'image (réalité virtuelle et augmentée) offre un potentiel, mais qui reste encore peu exploité dans ce domaine.

2. TECHNOLOGIES D'IMAGERIE APPLIQUÉES À L'ENVIRONNEMENT

2.1 Notions de base sur les technologies d'imagerie

Les technologies d'imagerie sont un ensemble de méthodes, techniques et systèmes qui permettent de représenter des objets par des images, ainsi que d'archiver, de traiter, d'analyser, d'interpréter ou de transmettre celles-ci. Elles comprennent notamment :

- les capteurs ;
- les systèmes de numérisation ;
- les ordinateurs, logiciels et algorithmes de traitement, d'analyse et de visualisation ;
- les appareils de reproduction, affichage et impression d'images.

La présente section donne un bref aperçu des systèmes et des techniques génériques d'imagerie qui peuvent être appliquées à différents domaines²⁷. Les sections suivantes présenteront différentes technologies d'imageries utilisées pour des applications environnementales spécifiques.

2.1.1 Capteurs

L'image est une représentation plane d'un phénomène observable, obtenue à partir d'un enregistrement structuré de données qui ont été saisies par un dispositif d'acquisition²⁸. Ces dispositifs, appelés capteurs, produisent les images par des procédés optiques, électro-optiques, mécano-optiques ou électroniques mesurant le rayonnement électromagnétique, ou parfois acoustique (par ex., sonar), émis ou réfléchi par un objet.

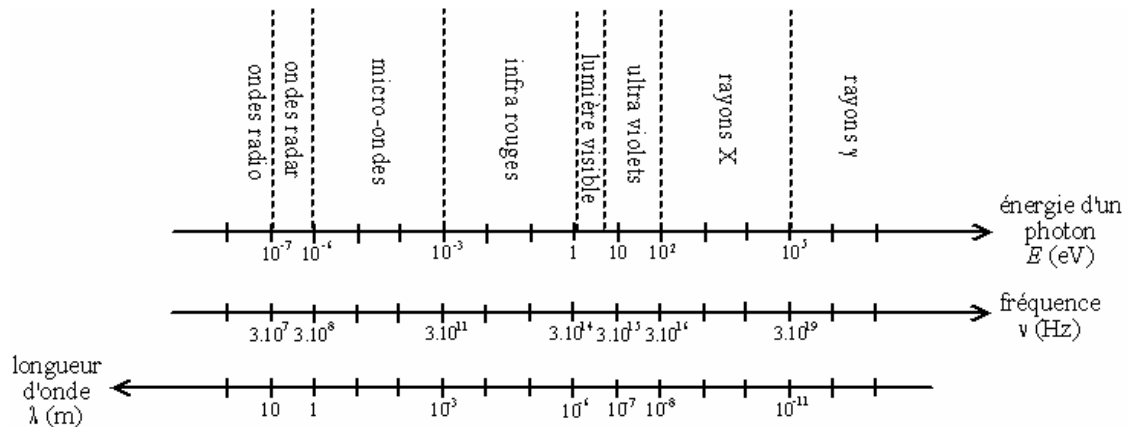
Certains capteurs, dits actifs, émettent un rayonnement dont ils mesurent l'intensité du retour suite à l'interaction avec l'environnement (par ex., radar, lidar). D'autres capteurs sont appelés passifs (par ex., caméras ou microscopes optiques), parce ce qu'ils enregistrent simplement le rayonnement provenant de l'environnement observé, sans l'irradier par leur propre énergie.

Les systèmes d'acquisition d'images varient selon le type de rayonnement qu'ils mesurent. En fonction de leurs caractéristiques physiques et chimiques, les objets émettent ou réfléchissent des rayons de différentes longueurs d'onde. Le spectre du rayonnement électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (rayons gamma et rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes, ondes radar et ondes radio), en passant par les

²⁷ Plus d'information sur les bases de l'imagerie numérique peut être trouvée dans [TUTP06] et [GAGN99].

²⁸ Adaptation de la définition du Grand dictionnaire terminologique, <http://www.granddictionnaire.com/>.

longueurs d'onde moyennes comprises dans l'ultraviolet, la lumière visible et l'infrarouge. La figure suivante résume ces concepts.



Spectre électromagnétique. Source : Wikipedia²⁹.

2.1.2 Traitements et analyses numériques

Un ordinateur exploite les images en format numérique. Sous cette forme, l'image est représentée comme une grille de pixels dont les valeurs numériques quantifient le niveau de luminosité des portions d'images correspondantes. Certains capteurs génèrent directement des images numériques. D'autres produisent une sortie qui doit être transformée en données numériques par un convertisseur (par ex. scanner, carte de numérisation).

Les traitements et analyses numériques de l'image qui peuvent ensuite être exécutés par un ordinateur sont multiples. De façon générale, ils se divisent en trois grandes catégories :

1. Traitement.
2. Analyse et interprétation.
3. Classification.

Les opérations de **traitement** consistent à manipuler les valeurs des pixels de l'image pour en corriger les défauts ou pour en faire ressortir les caractéristiques utiles à son interprétation. Se retrouvent, entre autres, dans cette catégorie, les méthodes de restauration, d'accentuation, de transformation, de recalage et de segmentation.

La restauration et la rectification d'images visent à corriger les distorsions radiométriques et géométriques provenant des conditions d'acquisition (lentilles imparfaites, flou

²⁹ Wikipedia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.

occasionné par le mouvement, bruit engendré par de mauvaises conditions d'éclairage, effets atmosphériques, etc.). L'accentuation, quant à elle, permet d'améliorer la qualité visuelle, par le rehaussement du contraste.

Les transformations de l'image regroupent toutes les manipulations sur les bandes spectrales telles que les opérations arithmétiques (addition, soustraction, multiplication, division) et le passage d'un espace de couleurs à un autre. Elles permettent d'obtenir une représentation de l'image révélant plus clairement certaines de ses composantes ou propriétés.

L'opération qui consiste à mettre en correspondance deux ou plusieurs images prises à différents moments, selon différents angles ou à partir de différents capteurs, s'appelle recalage. Elle s'impose lorsque des images doivent être comparées ou fusionnées.

La segmentation consiste à diviser une image en surfaces ou contours qui la composent. Les différents segments obtenus, ou groupements de ceux-ci, peuvent correspondre aux objets ou structures significatives de la scène imagée.

Les tâches **d'analyse et d'interprétation** d'images sont multiples et diverses. Leur automatisation s'avère souvent plus complexe que celle des opérations de traitement. Elles consistent à mesurer, de façon logicielle, différentes caractéristiques de l'image comme les tons ou couleurs, les textures, les formes et les patrons (*patterns*), dans le but de décrire le contenu de l'image. Parfois, les attributs mesurés sont purement mathématiques (par ex., la décomposition en composantes principales découlant de l'analyse statistique d'un ensemble d'images³⁰).

L'interprétation de l'image consiste le plus souvent à identifier les objets qui y sont présents ou à comprendre la scène qu'elle représente. Par exemple, un logiciel pourra discriminer les zones de forêt et les aires de culture sur une image satellite. Cette reconnaissance d'objets ou de scène implique souvent des algorithmes de classification. Ces derniers permettent de regrouper les images ou les portions d'images présentant des attributs similaires. Une entité inconnue (une nouvelle image ou nouvel objet) peut ensuite être assignée à la classe d'entités qui lui est la plus semblable.

2.2 Imagerie pour l'observation de la Terre

La télédétection emploie une panoplie de capteurs à imagerie adaptés pour la collecte à distance de différents types de données sur le milieu naturel. Spectromètres, radiomètres, diffusiomètres, radar, lidar, comptent parmi l'arsenal de technologies utilisées dans ce domaine.

³⁰ http://csnet.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf.

Ces capteurs peuvent se classer selon le rayonnement qu'ils détectent. Les capteurs optiques produisent des images à partir de rayons du spectre visible, les senseurs radars utilisent les micro-ondes, tandis que les systèmes imageurs thermiques captent certaines longueurs d'onde du rayonnement infrarouge. Il existe aussi des capteurs sensibles aux rayons gamma, mais ceux-ci visent des applications très spécifiques et peu courantes. Selon qu'ils éclairent ou non leur cible, ces capteurs sont actifs ou passifs.

En télédétection, les systèmes à imagerie s'installent sur différentes plateformes : dans l'espace, sur un satellite ou un véhicule spatial, dans l'atmosphère sur un avion ou un ballon ou au sol, sur une structure surélevée. Ces diverses plateformes permettent l'observation à différentes échelles.

La région qu'un capteur peut observer est d'autant plus grande que celui-ci est éloigné de la cible, mais le niveau de détail qu'il peut discerner s'en trouve diminué. La **résolution spatiale**, c'est-à-dire la dimension du plus petit élément au sol qui peut être distingué, varie d'un capteur à l'autre.

La **résolution spectrale** constitue un autre paramètre important des capteurs à imagerie. Il s'agit de la taille des fenêtres de longueurs d'onde utilisées par le capteur. Des objets de nature différente réfléchissent ou émettent la lumière différemment. Les objets possèdent donc une signature spectrale qui leur est propre. Par exemple, la chlorophylle d'une plante verte absorbe la plus grande partie de la lumière visible pour alimenter sa photosynthèse et réfléchit presque toute la lumière du proche infrarouge. Ainsi, la capacité d'un capteur à imager dans de minces bandes spectrales permet de différencier des cibles ayant des réponses spectrales très proches. Une résolution spectrale fine confère donc au système imageur un pouvoir discriminant plus grand dans l'identification des objets observés.

La capacité à reconnaître de petites différences dans le spectre électromagnétique constitue la **résolution radiométrique** d'un capteur. Une résolution radiométrique plus fine produit donc des images plus détaillées en niveaux de gris ou de couleurs.

Le dernier paramètre important d'un capteur consiste en sa **résolution temporelle**. Il s'agit de l'intervalle de temps nécessaire pour imager un même point de la surface terrestre. Pour un satellite en orbite, il s'agira de la durée d'un cycle orbital complet. Le facteur temps est déterminant pour plusieurs applications. C'est le cas pour la surveillance de phénomènes de courte durée, tels qu'une inondation ou un déversement de polluant, mais aussi pour la comparaison périodique de certaines données, comme le moment de fonte de la glace d'une année à l'autre.

La résolution spatiale, la résolution spectrale, la résolution radiométrique et la résolution temporelle détermineront donc le type d'applications pour lesquelles un système de télédétection à imagerie sera utilisé. D'autres facteurs, comme la disponibilité et le coût des images influenceront aussi le choix du capteur pour une application donnée.

2.2.1 Capteurs optiques

La plupart des capteurs optiques acquièrent les données grâce à un système à balayage. Contrairement aux capteurs photographiques, leur champ de vision est étroit. L'image est formée suite au déplacement de ce dernier sur toute la surface pour en capter une représentation bidimensionnelle complète.

Les bandes spectrales acquises par un capteur optique déterminent les applications pour lesquelles il sera utile. Lorsqu'un capteur mesure la réflectance dans une seule bande électromagnétique large, il produit des images en noir et blanc, appelées **panchromatiques**. Celles-ci représentent les niveaux de luminosité dans cette bande spectrale unique. Ce type d'imagerie sert principalement à extraire des informations géométriques sur la scène observée. Il permet de détecter les structures principales sur le terrain (routes, bâtiments, plans d'eau, etc.) et s'utilise pour la cartographie au niveau parcellaire. L'imagerie panchromatique s'emploie notamment pour l'analyse de l'occupation du sol, de l'occupation urbaine, du couvert végétal, et de physiographie. Les satellites SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) produisent ce type d'images en offrant une grande précision spatiale.

L'**imagerie multispectrale** représente une scène à partir de sa réflectance mesurée dans plusieurs bandes spectrales (au plus une dizaine). L'information des différentes bandes se combine pour créer des couleurs sur l'image. Les données multispectrales renseignent sur la nature des structures observées. Par exemple, elles permettent de différencier les espèces végétales sur le terrain ou de distinguer les types de couverts. Elles recèlent donc de nombreuses applications comme l'analyse de végétation, des cultures, des différentes composantes du territoire. Les satellites Landsat utilisent des capteurs multispectraux offrant une grande variété spectrale.

L'**imagerie hyperspectrale** consiste en une acquisition simultanée d'images en de nombreuses bandes spectrales étroites et contiguës (généralement 100 ou plus)³¹. Elle fournit une information plus détaillée sur les propriétés spectrales d'une scène que l'imagerie panchromatique ou multispectrale. Elle permet donc une identification plus précise des entités terrestres, ainsi que de leurs propriétés physiques et chimiques.

La technologie des imageurs spatioportés hyperspectraux n'en est qu'à ses débuts. Pour le moment, les capteurs hyperspectraux sont déployés sur des plateformes aériennes. Le premier satellite à recueillir des données hyperspectrales depuis l'espace fut le satellite EO-1 de la NASA (novembre 2000).

Les images hyperspectrales aéroportées sont utilisées en agriculture de précision pour mesurer des paramètres tels que le contenu en eau de la végétation, l'azote, la chlorophylle

³¹ Définition tirée de http://ccrs.nrcan.gc.ca/hyperview_f.php.

et la surface foliaire³². L'émergence de ce type d'imagerie et la richesse de son contenu nécessitent le développement de nouvelles techniques de visualisation, de traitement et d'analyse des données hyperspectrales. Pour ce faire, le Centre canadien de télédétection (CCT) a développé le système ISDAS (Imaging Spectrometer Data Analysis System)³³. L'imagerie hyperspectrale spatioportée trouvera aussi des applications pour l'exploration minérale³⁴ et la foresterie³⁵.

Les **satellites à faible résolution spatiale**, tels que NOAA AVHRR (États-Unis) et SPOT VGT (France), servent surtout à l'observation de grandes superficies pour des analyses à l'échelle régionale. Leur résolution spatiale est de l'ordre du kilomètre. Le suivi des feux de forêts, l'étude des océans, les relevés météorologiques, la surveillance des événements régionaux climatiques ou sanitaires (désertification, insectes, etc.) et l'observation de l'occupation du sol sur un vaste territoire (par ex., le Québec en entier) en sont de bons exemples.

Des observations plus localisées, comme l'identification d'espèces d'arbres, le suivi d'aquacultures ou la cartographie fine, nécessitent des images produites par des **satellites à haute résolution**. L'observation très précise de petits territoires, comme celle requise en agriculture de précision, s'effectue souvent au moyen d'imagerie aérienne à haute résolution. Pour ce type d'applications, les satellites IKONOS, Landsat, SPOT, ORBVIEW-3 et le nouveau satellite GEOEYE-1 offrent une grande précision spatiale allant de moins d'un mètre à 30 mètres.

2.2.2 Capteurs radars

Le plus important type d'imagerie radar est le SAR (Synthetic Aperture Radar), capteur actif qui transmet un signal radio (pulsé) d'une longueur d'onde connue et qui capte le signal réfléchi par la surface de la Terre. Les satellites européens ERS et ENVISAT et le satellite canadien RADARSAT-1 sont munis d'un capteur radar. L'image produite est générée par ordinateur en détectant le retour du signal. Le processus de génération de l'image utilise le déplacement relatif de la plateforme de l'antenne radar relativement à la surface de la scène, afin de simuler artificiellement une longue antenne (appelée « ouverture synthétique ») et d'obtenir des images à des résolutions très fines. Les capteurs radars présentent un important avantage sur les capteurs optiques; celui de pouvoir prendre des images de nuit comme de jour, dans toutes les conditions météorologiques car leur rayonnement passe à travers les nuages, la pluie, le brouillard et la fumée.

Les capteurs radars sont plus utilisés pour mesurer des propriétés physiques/géométriques que chimiques; l'angle d'incidence et la fréquence du signal radio émis déterminant son

³² http://ccrs.nrcan.gc.ca/optic/hyper/farming_f.php.

³³ http://cct.nrcan.gc.ca/optic/hyper/index_f.php.

³⁴ http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/hyper_geologie.asp.

³⁵ http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/hyper_foresterie.asp.

utilisation. On s'en sert par exemple pour le suivi et la détermination du contenu en sel des glaces (en particulier RADARSAT-1), et les propriétés des sols comme la mesure de la rugosité d'une surface, la teneur en eau et de la constante diélectrique qui permettent de définir l'état des cultures, la susceptibilité des terres à l'érosion et les besoins en matière d'irrigation. Bientôt sera lancé RADARSAT-2, un capteur radar polarimétrique qui offrira un plus grand pouvoir discriminant entre les divers éléments de la surface terrestre.

2.2.3 Lidar

Le fonctionnement du lidar (Light Detection and Ranging) ressemble à celui du radar, à la différence qu'il projette un faisceau laser, plutôt qu'électromagnétique, et qu'il fonctionne dans le domaine du visible, de l'ultraviolet et de l'infrarouge, plutôt que dans celui des ondes radio. Le système émet des impulsions laser sur la cible et mesure l'énergie retournée par celle-ci. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal indique la distance de la cible au détecteur. Le lidar fournit donc une information sur le relief de la scène.

Quoique l'utilisation du lidar en télédétection soit encore assez récente, il trouve son application dans des domaines environnementaux tels que :

- la cartographie topographique ;
- la cartographie forestière, où il permet de mesurer la taille des arbres ;
- l'hydrologie, pour évaluer la profondeur des eaux et modéliser les débits et patrons d'écoulements ;
- l'étude de l'atmosphère, dans l'analyse des aérosols présents dans les différentes couches, celle des nuages et dans la surveillance des mouvements atmosphériques.

2.2.4 Imagerie thermique

La portion infrarouge du spectre électromagnétique se divise entre l'infrarouge réfléchi et l'infrarouge émis ou thermique. Alors que l'infrarouge réfléchi se détecte de la même façon que la lumière visible, l'infrarouge thermique, qui consiste en un rayonnement de chaleur, nécessite des capteurs adaptés.

Les détecteurs thermiques sont sensibles aux photons infrarouges émis dans la plage thermique du spectre (3 à 15 μm). Ils mesurent la température de surface et les propriétés thermiques des objets observés. Pour produire des mesures fiables, leur propre émission de chaleur doit être limitée par des procédés de refroidissement.

Ne dépendant pas de la lumière du soleil, les systèmes à imagerie thermique opèrent jour et nuit. En environnement, ils contribuent à surveiller les phénomènes impliquant des variations de température, comme la détection de feux de forêts, la surveillance des volcans, l'acquisition de données météorologiques ou le relevé de la température de la

surface des océans. Les satellites NOAA, TIROS, et METEOSAT sont munis de détecteurs thermiques.

2.2.5 Photographie

Premier système d'imagerie utilisé en télédétection, l'appareil photographique s'avère, encore de nos jours, un outil précieux pour l'observation de la Terre. Il peut être installé aussi bien sur des plateformes terrestres, aéroportées que spatioportées.

La photographie aérienne est probablement la plus utilisée pour des observations très détaillées du terrain, car elle offre une excellente résolution spatiale (moins de 50 cm). Elle s'emploie aussi en complément de l'information fournie par d'autres capteurs. Grâce au déplacement de l'avion, la prise de photos successives le long de la ligne de vol permet de faire de la visualisation stéréoscopique des images produites. De plus, la géométrie de la scène étant connue, des mesures peuvent être prises sur les photos aériennes. Cette discipline s'appelle photogrammétrie.

Les appareils photographiques génèrent des images panchromatiques dans l'ultraviolet et le visible, ou noir et blanc, dans l'infrarouge. La photographie noir et blanc infrarouge révèle très efficacement l'humidité et la fonction chlorophyllienne. Elle est tout indiquée pour l'identification d'espèces végétales. La photographie couleur et couleur infrarouge existe aussi. Toutefois, son coût plus élevé en restreint parfois l'utilisation.

Autrefois uniquement produite sur pellicule, la photographie aérienne passe désormais au format numérique. La résolution très fine de la pellicule lui a longtemps conféré sa prédominance. Cependant, les avancées technologiques dans la production de CCD (*charge coupled devices*) alliant grande taille et résolution suffisante favorisent l'émergence de la photographie numérique en télédétection. La résolution spatiale des appareils photographiques numériques est d'approximativement 0,3 m. De plus, ils possèdent une résolution radiométrique supérieure au film. La production d'images directement en format numérique en facilite le stockage et l'utilisation pour des traitements informatiques. Le problème de produire un CCD couleur de grand format et de haute résolution n'est toutefois pas encore résolu.

2.2.6 Logiciels

L'industrie de la télédétection dispose d'une bonne quantité de logiciels spécialisés. Parmi les plus importants, mentionnons les Systèmes d'information géographique (SIG). Les SIG sont des logiciels permettant d'afficher, interroger, actualiser et analyser des données localisées (points géographiques) et les informations qui leur sont associées³⁶. Ils produisent et traitent les données reliées à des cartes et des images aériennes qui servent à

³⁶ <http://www.bloy.geometre-expert.fr/Parisexpert/aide/Aideframe.cfm?fichi=LEXIQUE.htm>.

l'analyse géomorphologique d'un territoire et son paysage³⁷. Ils assistent donc les processus de décision face aux enjeux paysagers et environnementaux. De plus, ils possèdent des fonctions de représentation spatiale 3D, quoique parfois schématiques, qui peuvent être combinées à des requêtes. Les logiciels ArcGIS et MapInfo sont des exemples de plateformes de SIG.

D'autres logiciels couramment utilisés pour le traitement et l'analyse d'images et de données afférentes en télédétection sont Geomatica (de PCI), ER Mapper, TNTmips, eCognition, ERDAS-IMAGINE, GEOVIS/LCCS, ILWIS, WINCHIPS, IDRISI et Arcview.

2.3 Visionique pour le tri des matières résiduelles

Les **systèmes de tri optiques** appartiennent aux technologies de visionique. Ils interviennent à différentes étapes du processus de tri des matières résiduelles. Ils peuvent accomplir un tri préliminaire avant une étape de séparation manuelle, afin d'augmenter le débit de matières traitées et la qualité des extrants, ou servir à terminer le tri.

La plupart des systèmes de tri optique fonctionnent sous le même principe : les matières défilent sur un convoyeur et passent – ou tombent – devant un capteur optique émettant de la lumière. Un ordinateur effectue le traitement et l'analyse d'images et identifie les objets défilant dans le champ visuel de la caméra. Pour le plastique et le verre, les morceaux valables sont suivis par le système et ensuite éjectés au bout du convoyeur. Pour le papier, ce sont les contaminants qui sont identifiés et retirés.

2.3.1 Imagerie couleur et imagerie spectrale

Plusieurs systèmes imageurs appliqués au tri des matières résiduelles sont basés sur la détection de couleurs dans le spectre visible. Le plus souvent, ils intègrent des caméras couleur RGB (Red-Green-Blue) (CMOS ou CCD). Certains peuvent aussi opérer d'autres analyses spectrales, principalement dans l'infrarouge³⁸, ou parfois dans plusieurs longueurs d'onde combinées. Ils peuvent aussi extraire des informations sur la taille et la forme des matières inspectées pour les identifier.

Toutefois, les systèmes les plus couramment utilisés pour l'analyse des matières recyclables sont les spectromètres³⁹ à infrarouge ou rayon X. Les propriétés physiques et chimiques des matières déterminent leur réponse spectrale à l'illumination (leur signature

³⁷ Plus de détails peuvent être trouvés dans <http://perso.orange.fr/thierry.joliveau/Biblio/Geoevenement%202003.pdf>.

³⁸ Le premier système de tri par analyse d'images proche-infrarouge a été développé conjointement par les entreprises norvégiennes Elopak et SINTEF au début des années 90. Il a ensuite été commercialisé par TiTech.

³⁹ Un spectromètre est un appareil permettant de mesurer l'abondance des constituants d'un spectre suivant les longueurs d'onde ou les masses de ces constituants. L'étude des spectres est appelée la spectrométrie. Définition tirée de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrographie>.

en longueur d'onde à l'échelle moléculaire). Celle-ci est mesurée par le spectromètre et permet l'identification des objets observés. Cependant, ces spectromètres ne génèrent pas nécessairement d'images.

Les spectromètres imageurs, surtout utilisés en télédétection, commencent à s'appliquer en vision industrielle pour les tâches d'inspection et de classification en temps réel ([CARL06]). **L'imagerie spectrale** – aussi nommée imagerie hyper spectrale – combine l'analyse spectrale et le traitement d'images⁴⁰. Ceux-ci sont aussi intégrés à certains systèmes de tri des matières recyclables.

Un système d'imagerie spectroscopique se compose généralement d'une source lumineuse, une lentille (optique de microscope ou de caméra selon la taille de la zone à imager), un spectromètre et une caméra matricielle (CCD ou autre)⁴¹. La décomposition du faisceau lumineux en bandes spectrales se fait grâce à un dispositif de dispersion et recombinaison de type PGP (*Prism-Grating-Prism*). Pour l'inspection d'objets défilant à haut débit, la surface observée est imagée une ligne à la fois. Le mouvement des échantillons devant le capteur permet de construire l'image à partir d'une séquence de lignes. Un logiciel analysant l'information spectrale contenue dans l'image y est greffé⁴².

Ces systèmes procèdent simultanément à une analyse spectrale et spatiale. La première dimension de l'image représente les positions d'une ligne de points de l'objet imagé. La deuxième dimension représente le spectre pour chaque point. Une troisième dimension représentant la variation spatiale de l'alignement de points, attribuable au défilement d'un objet sous le capteur, peut s'ajouter pour former un cube image.

Les spectromètres standards mesurent la signature spectrale en un seul point de surface à la fois. Contrairement à ceux-ci, les spectromètres imageurs n'ont pas besoin de recourir à plusieurs senseurs ou à des dispositifs mécaniques déplaçant ceux-ci sur une surface pour collecter des mesures spectrales en plusieurs points. Ceci réduit le temps d'acquisition des données. De plus, la richesse du spectre analysé par les systèmes d'imagerie spectroscopique offre une plus grande précision pour l'analyse de la couleur que les simples caméras RGB. Ils permettent de surcroît d'analyser la composition chimique et les propriétés physiques de la matière observée.

La plage spectrale utilisée dépend de l'application. Les ultraviolets et la lumière visible (200 à 800 nm) servent pour l'imagerie de fluorescence ou l'imagerie couleur dans plus de bandes spectrales qu'en RGB. Le proche-infrarouge (800 à 2500 nm) offre un bon pouvoir de discrimination entre les matières et une sensibilité moyenne, tandis que l'infrarouge

⁴⁰ Une discussion plus étendue sur la spectroscopie hyper spectrale et les spectromètres imageurs peut être trouvée dans [AIKI01].

⁴¹ Pour un schéma, consulter [HERR98], p. 5.

⁴² Exemples de spectromètres imageurs pour la vision industrielle : **VTT** (http://www.vtt.fi/palvelut/cluster1/topic1_7/optical_sensors_ref_200602.jsp?lang=en) et **ImSpector** (<http://www.channelsystems.ca/Attachments/ImSpector/ImSpector-Brochure.pdf>).

moyen (2 500 à 25 000 nm) possède les meilleures capacités de classification. La plage infrarouge est souvent la plus utilisée pour l'identification des matières recyclables, notamment pour différencier les divers types de plastique et de verre. Dans ce cas, des caméras munies de matrices à plan focal⁴³ sensibles à l'infrarouge pourront être utilisées dans les systèmes d'imagerie spectrale.

Le couplage spectromètre-caméra génère un volume important de données. Leur traitement requiert de l'optimisation et l'application d'algorithmes de réduction de données pour convenir aux applications d'analyse en temps réel. Le tri des matières recyclables s'effectue à haut débit. La reconnaissance des matières inspectées doit se synchroniser avec les dispositifs mécaniques d'éjection, ce qui impose des contraintes serrées au temps de traitement. Par exemple, pour la séparation du papier, les systèmes inspectent entre quatre et huit tonnes à l'heure. L'acquisition et l'analyse de données doivent se faire en environ 20 ms.

Pour le tri automatisé des matières résiduelles, les traitements se divisent en deux phases : l'entraînement et la classification. Pour l'entraînement il faut fournir au système la signature de toutes les catégories de matières à reconnaître. La classification consiste à comparer les spectres observés et à les associer aux spectres des matières pour lequel le système est entraîné. Ces processus font appel aux techniques d'analyse multivariée, de réduction de dimensionnalité⁴⁴ et d'analyse de groupement (*clustering*).

2.3.2 Exemples de systèmes de tri optique

Les exigences du tri varient pour chaque matière recyclable. Les différents débouchés de récupération pour ces matières dicteront des normes de qualité et de pureté bien précises pour les lots de matières triées.

Par exemple, le verre recyclé est destiné à des marchés différents selon sa couleur (coloré par rapport à incolore). Le verre consigné pourra être recyclé sous forme de bouteille entière. Dans les centres de tri des rebuts urbains, le verre récupéré est débarrassé des impuretés (débris de faïence, roche ou porcelaine), puis nettoyé et broyé en fragments appelés calcins qui seront retransformés en verre. Les caméras couleur et les systèmes d'analyse spectrale à rayon X sont souvent utilisés pour ce type de tri.

Pour le plastique, les différents systèmes optiques viseront à différencier des types de plastiques comme le PET (Polyéthylène Terephthalate), le PVC (polyvinyl chloride), le PP (Polypropylène), le PE (Polyéthylène) ou le PS (Polystyrène). Le PET recyclé est probablement la résine qui possède les marchés les mieux établis, vu ses multiples usages, notamment dans la fabrication des textiles. La classification des plastiques peut se baser sur

⁴³ En anglais, *Focal Plane Array (FPA)* : Une matrice de cellules sensibles aux longueurs d'onde infrarouges opérant de façon similaire à un CCD dans le spectre visible.

⁴⁴ Par exemple, l'analyse en composantes principales.

l'analyse de couleur, de la luminosité et de la taille. Elle s'opère grâce à des caméras standards (noir et blanc ou couleurs) ou avec des spectromètres.

Il existe différents systèmes de tri optique sur le marché. Quelques exemples de technologies sont énumérés ci-dessous.

- **Les systèmes TiTech.** Plus d'un millier sont en opération dans le monde. Ils reposent sur la spectroscopie pour inspecter les matières recyclables. Leurs caractéristiques de couleurs, types, formes et positions sont inférées par des analyses dans le spectre visible et le proche-infrarouge. Ils permettent de trier différentes sortes de papier et plastique avec une précision de 98%.
- **Les systèmes MikroSort® de Morgensen**⁴⁵. Ils sont munis de caméras couleur à balayage linéaire et de détecteurs de métal. Ils opèrent des analyses de couleur, d'intensité lumineuse et de taille. Ils sont conçus pour trier des matériaux et granulométries variés, tels que le verre recyclé (verre plat et creux), les paillettes de matières plastiques (PET, PE, PP, PVC) de 3 à 12 mm, les gravats (débris de tuiles/béton) et les ordures ménagères ou industrielles.
- **Système d'Averna Vision & Robotic Inc.** Cet intégrateur de Montréal a développé un système permettant de trier les bouteilles de plastique PET transparent défilant à neuf pieds/minute. Les bouteilles sont éclairées à l'ultraviolet et observées par une caméra couleur CMOS de PixelLink. Le système utilise les outils matériels et logiciels de traitement et d'analyse d'images National Instruments (NI). À la suite à deux seuillages dans l'espace de couleur HIS pour séparer l'information de blanc de celle couleur et à un dénombrement de pixels sur chacune des images, il procède à la classification de plastique coloré ou non. Le temps de traitement alloué à chaque image est inférieur à 25 ms. Ce système sert à effectuer un premier tri qui fait passer de 80% à 20% le nombre de bouteilles qui doivent être triées manuellement, améliorant ainsi la qualité du tri.⁴⁶
- **Le Planeco de Pellenc.** Ce module intégré aux machines de tri des bouteilles de plastique de Pellenc combine une caméra, pour le tri par couleur, et un spectromètre infrarouge pour le tri des matières. Un système pneumatique au bout d'un bras robotisé aspire les bouteilles à retirer du tapis et les souffle dans le conteneur approprié. L'environnement de développement LabWindows/CVI est utilisé pour l'acquisition de l'image et le contrôle du bras robotisé.⁴⁷
- **Technologie en développement.** Les caméras linéaires à matrice à plan focal composée d'indium, gallium et arsenide (InGaAs), sensible à l'infrarouge de courte longueur d'onde (SWIR), sont expérimentées pour la discrimination des différents types de plastique. Cette technologie utilise plusieurs caméras agissant chacune comme

⁴⁵ http://www.mogensen.de/fra/farbsortierung_allgemein.htm.

⁴⁶ <http://sine.ni.com/csol/cds/item/vw/p/id/718/nid/124100>.

⁴⁷ <http://sine.ni.com/csol/cds/item/vw/p/id/85/nid/124100>.

un spectromètre analysant un point du convoyeur. Les caractéristiques du spectre de réflexion permettent d'identifier le type de plastique⁴⁸.

- **Machines de tri Bevesys.** Ces machines trient des bouteilles (verre et PET) et cannettes consignées qui leur sont retournées. L'entreprise finlandaise a développé un système de visionique 2-D et 3-D. La reconstruction 3-D se génère à partir d'images prises par deux caméras. L'identification est faite à partir de la couleur et de mesures géométriques.
- **Système HISPIM du laboratoire DV.** Utilisé pour le tri du verre, ce système sert à discriminer les contaminants transparents, tels que la céramique. Pour effectuer la détection, il est équipé d'un spectromètre imageur combinant une lentille, une optique PGP (*Prism-Grating-Prism*) avec une caméra CMOS. L'utilisation d'une matrice infrarouge permet d'effectuer des mesures simultanées sur de grandes régions linéaires avec une haute résolution spatiale en minimisant le temps d'acquisition. Des mesures spectrales sont prises simultanément dans l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet.

2.4 Imagerie pour les analyses environnementales en laboratoire

2.4.1 Microscopie

La microscopie joue un rôle fondamental dans les analyses biologiques et microbiologiques reliées à l'environnement. Elle permet d'observer, au moyen d'un microscope, des structures qui seraient invisibles à l'œil nu, comme des micro-organismes ou des molécules.

Les techniques de microscopie se divisent principalement entre les technologies optiques, électroniques et celles utilisant une sonde à balayage.

Les microscopes optiques et électroniques fonctionnent sous le même principe : une onde est soit projetée sur une préparation (l'échantillon) qui la diffracte, ou est émise par celle-ci, puis concentrée à travers un oculaire produisant une image observable. En microscopie optique, un flux de photons sert à générer l'image, tandis que la microscopie électronique utilise un faisceau d'électrons. La formation de l'image d'un microscope à sonde à balayage s'opère par le déplacement, sur la surface de l'échantillon, d'une sonde physique qui mesure l'interaction surface-sonde en chaque point.

L'image produite par un microscope peut être regardée par l'œil humain ou transmise à un système d'affichage ou d'enregistrement. Dans les systèmes modernes de microscopie, les images sont enregistrées par des caméras numériques, stockées sur ordinateurs et traitées par des logiciels spécialisés.

⁴⁸ Voir [COHE04] pour plus de détails sur les matrices à plan focal InGaAs.

Il existe des dizaines de techniques de microscopie adaptées à des usages différents^{49 50}. Les **techniques optiques** sont les plus largement répandues, particulièrement en biologie et en géologie. Pour éclairer les échantillons, elles utilisent la lumière à différentes longueurs d'onde : ultra-violet, visible et infrarouge. Toutefois, la résolution de la microscopie optique est limitée à la moitié de la longueur d'onde d'éclairement. Elle peut atteindre, au mieux, 0,2 μm pour l'ultraviolet. Les détails fins de la structure cellulaire peuvent donc y échapper. L'utilisation de rayons X, ondes plus courtes, permet d'améliorer la résolution.

La **microscopie optique binoculaire** et la **stéréomicroscopie** permettent l'observation de la structure 3D de spécimens plus gros à de faibles grossissements. L'appréciation du relief se fait par l'observation de la même image avec les deux yeux, dans le cas du microscope binoculaire, tandis qu'il est recréé à partir de deux vues différentes par le microscope stéréoscopique.

Le fonctionnement de certains microscopes optiques repose sur le phénomène de fluorescence, c'est-à-dire la propriété de certains composés d'émettre de la lumière de longueur d'onde plus grande que celle dont ils sont irradiés. En **microscopie à fluorescence**, les échantillons sont marqués par des molécules fluorescentes appelées fluorophores ou fluorochromes et l'image formée en représente la luminescence. Lorsque l'observation ne se limite pas à un plan focal, on parle de **microscopie à épifluorescence**.

Utilisée depuis une quinzaine d'années, la **microscopie confocale** permet d'obtenir des images de plus haute résolution que les techniques classiques de microscopie à fluorescence. Dans celles-ci, l'éclairement de plans hors foyer lors de l'observation d'échantillon plus épais amène une perte de résolution axiale et une superposition d'information. Le microscope confocal concentre la lumière d'un laser sur de petites surfaces de focalisation sur le spécimen fluorescent. Une reconstruction tridimensionnelle peut être obtenue par l'assemblage des sections 2D successivement imagées. Cette technique permet d'augmenter la résolution, le contraste et la profondeur de champ des images. De plus, le laser peut activer différents colorants fluorochromes permettant de suivre en temps réel des paramètres morphologiques ou physiologiques spécifiques des cellules ou des tissus.

La **microscopie électronique** offre une résolution nettement supérieure à la microscopie optique. L'utilisation d'électrons dont la longueur d'onde est beaucoup plus courte que celles des photons permet d'imager des structures à l'échelle du nanomètre. Elle regroupe deux grands types de techniques : la **microscopie électronique à transmission** et la **microscopie électronique à balayage**. Suivant le même principe que la microscopie optique en lumière directe, la microscopie électronique à transmission projette un faisceau

⁴⁹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>.

⁵⁰ <http://www.ou.edu/research/electron/www-vl/techniqu.shtml>.

d'électrons à travers la préparation. La microscopie à balayage, quant à elle, produit des images en pseudo 3D⁵¹.

D'après les experts consultés pour cette étude, les techniques de microscopie décrites ci-dessus sont les plus communément utilisées pour les analyses environnementales en laboratoire. Quelques exemples d'application de ces technologies à ce domaine suivent.

- Microscopie optique et électronique (2D et 3D) :
 - identification de différents micro-organismes comme des bactéries, des virus, des algues ou du matériel microscopique végétal ou animal;
 - identification de particules microscopiques comme les pollens, les fibres dans l'air, les aérosols;
 - comptage du nombre de spores produits pour déterminer la qualité du BT généré à partir des boues des usines d'épuration;
 - cytométrie et analyses immunohistochimiques sur des cellules;
 - observation de plus gros spécimens par microscopie binoculaire (stéréo), comme des poils pour l'identification des animaux dont ils proviennent.
- Microscopie à fluorescence X : identification chimique des spécimens, comme les contaminants dans l'eau, l'air, le sol et les rejets ou matières résiduelles.

La plupart des fabricants de microscopes fournissent des logiciels de capture, de traitement et d'analyse d'images avec leur produit⁵². Ceux-ci permettent notamment de visualiser les images, d'en rehausser la qualité, d'y segmenter et compter les cellules ou les colonies de bactéries, de prendre certaines mesures comme la grosseur des noyaux de cellules, de mesurer des paramètres morphologiques des particules imagées et de sauver des séquences de traitements.

Cependant, suite à la consultation de certains experts du milieu des analyses environnementales au Québec, il ressort qu'une grande partie du travail d'analyse visuelle se fait encore par des humains. Le recours aux logiciels d'imagerie de microscopie semble plus fréquent dans les laboratoires de recherche que dans ceux menant des analyses microbiologiques courantes de qualité de l'eau, de l'air, du sol et des analyses de matières résiduelles.

⁵¹ Pour des exemples d'images de ces deux types de microscopie électronique, voir http://sci.agr.ca/crda/indust/microscope_f.htm#microscopie_electronique_a_transmission_met.

⁵² Des références à d'autres logiciels et instruments d'analyse en laboratoire peuvent être trouvées sur les sites <http://www.itg.uiuc.edu/ms/software/>, http://cimewww.epfl.ch/EMYP/comp_vis.html et <http://home.ncifcrf.gov/ccr/flowcore/corplink.htm>.

2.4.2 Cytométrie en flux et cytométrie par imagerie

La cytométrie en flux est une technique d'analyse de particules en suspension dans un flux liquide. Elle permet de faire défiler des molécules ou cellules, une à une, et à grande vitesse dans le faisceau d'un laser. La lumière réémise (par diffusion ou fluorescence) permet de classer la population suivant plusieurs critères et de les trier⁵³.

Entre autres caractéristique, cette technique sert à déterminer l'état d'activation, de maturation, de prolifération, ou de mort d'une suspension cellulaire. Grâce à des marqueurs membranaires spécifiques, elle permet de différencier des populations de cellules d'aspect identique à l'œil nu ou au microscope. Il s'agit d'une technique très puissante, puisqu'elle permet des analyses cellule par cellule, tout en allouant le traitement de plusieurs centaines de milliers de cellules en quelques secondes, ce qui n'est pas possible avec la microscopie optique à fluorescence.

Les cytomètres modernes possèdent plusieurs lasers et détecteurs de fluorescences permettant des caractérisations variées et une identification très précise de populations de cellules. Traditionnellement, les cytomètres produisent des données sur les intensités de fluorescence représentées sous forme d'histogrammes ou de nuages de points en 2D et 3D⁵⁴. Toutefois, certains appareils combinent des technologies d'imagerie, par exemple de microscopie, à l'analyse cytométrique en flux⁵⁵. Des images de cellules individuelles peuvent être acquises pour en analyser la signature de fluorescence.

Ces techniques peuvent être utilisées lors d'analyses cellulaires pour l'environnement. Par exemple, elles s'appliquent à l'étude du phytoplancton, des algues unicellulaires, des bactéries et des protozoaires dans les eaux naturelles. Elles contribuent à la différenciation de ces cellules avec les particules non vivantes comme les débris organiques et non organiques et les minéraux.

2.4.3 Scanographie

Aussi utilisée en médecine, la scanographie est une méthode d'imagerie assistée par ordinateur qui permet d'étudier et de traiter les coupes tomographiques en utilisant un tomodensitomètre qui révèle les différences relatives de densité des diverses matières observées en fonction des variations d'absorption des rayons X⁵⁶. En environnement, elle sert notamment à étudier la structure de carottes de sols ou de sédiments.

⁵³ Définition tirée de http://fr.wikipedia.org/wiki/Cytom%C3%A9trie_en_flux.

⁵⁴ Des logiciels comme CellQuest, développé par BD (Becton, Dickinson and Company), permettent le traitement des données de cytométrie en flux.

⁵⁵ Par exemple, <http://www.amnis.com/>, <http://www.compucyte.com/icolor.htm> et <http://www.fluxionbio.com/products/cytoflux.html>.

⁵⁶ Définition tirée du Grand dictionnaire terminologique, <http://www.granddictionnaire.com/>.

2.4.4 Images thermiques

Certaines analyses environnementales se basent sur des images thermiques pour détecter des températures anormales. Celles-ci permettent de détecter des sources de pollution de température différentes au milieu où elle se trouve. Ce sera, par exemple, le cas de certains rejets de cheminée, d'un déversement d'acide dans une rivière par une usine, ou la présence de certains contaminants dans l'eau traitée par une usine d'épuration.

Ce type d'inspection se fait grâce aux images captées par une caméra thermique. Toutefois, l'analyse des images et le processus de diagnostic ne sont pas informatisés.

2.5 Composition et synthèse d'image pour l'analyse paysagère

Les outils de représentation traditionnellement utilisés en analyse paysagère et en planification environnementale sont la cartographie 2D, la photographie (aérienne ou au sol), le bloc-diagramme, le croquis et la maquette matérielle. La vidéo est de plus en plus utilisée pour récolter l'information paysagère.

Les techniques informatiques offrent de nouvelles voies pour manipuler les images de paysages et créer de nouvelles représentations plus détaillées, malléables et intelligibles, pour les non-initiés comme les experts. Par exemple, le traitement numérique des images permet de synthétiser des vues actuelles et prospectives de paysages plus efficacement. De plus, les techniques de modélisation et visualisation 3D fournissent de nouveaux paradigmes de représentation paysagère offrant plus de réalisme et d'interaction pour l'utilisateur. Ces nouvelles maquettes numériques en trois dimensions deviennent de plus en plus populaires auprès du public dans différentes applications disponibles sur le Web (par ex., Google Earth, Terraform, Skyline).

Les technologies d'imagerie appliquées à l'analyse de paysage et la planification environnementale touchent principalement à la composition et la synthèse d'images. On y retrouve les logiciels de photomontage, de représentation géomatique, de conception assistée par ordinateur (CAO), de création de bloc-diagrammes, de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

Toutefois, ces techniques reçoivent des niveaux différents d'adoption dans le monde de l'analyse paysagère et de la planification territoriale. Une certaine réticence, voire méfiance, semble exister chez une grande partie des professionnels de ce domaine face aux technologies numériques. L'informatique paysagère est nettement plus répandue pour traiter les dimensions objectives du paysage (géomorphologie) que ses aspects subjectifs et émotifs. Beaucoup d'experts restent sceptiques sur les capacités des outils informatiques à traduire correctement ces dimensions.

2.5.1 Photomontage

Le photomontage consiste à créer de nouvelles représentations composites du paysage en découpant et collant différentes photos. Des logiciels comme Photoshop permettent de réaliser aisément ce type de montage numérique. Le photomontage servira, par exemple, à introduire la photo d'une pièce d'équipement, comme une éolienne, dans la photo d'un site envisagé pour un projet de développement éolien, afin d'en évaluer l'effet visuel. C'est la technique la plus utilisée pour les études d'impact. Elle produit une représentation fidèle qui est facile à comprendre. Cependant, elle n'offre qu'un point de vue figé dans le temps et l'espace, en fonction des conditions dans lesquelles sont prises les photos et du cadrage choisi par le photographe.

2.5.2 Conception assistée par ordinateur (CAO)

La conception assistée par ordinateur est la discipline ayant recours aux techniques informatiques pour imaginer un objet, en achever la forme et générer les données nécessaires à sa fabrication⁵⁷. Elle s'impose pour la conception et la visualisation de projets en urbanisme, architecture et paysage. Elle permet de produire des maquettes numériques 2D ou 3D qui peuvent facilement être modifiées en cours de projet. Contrairement à la photo, la CAO permet de générer plusieurs vues différentes d'un même objet paysager.

2.5.3 Bloc-diagramme

Le bloc-diagramme paysager est une représentation graphique en perspective et en coupe d'une portion d'espace⁵⁸. Il s'agit d'un bloc 3D représentant le relief du terrain auquel sont superposées des données 2D sur l'occupation du sol. Celles-ci peuvent être biogéophysiques, comme la répartition de la végétation, ou anthropiques, comme la représentation des zones bâties⁵⁹. Le bloc-diagramme peut être réalisé à partir d'un modèle numérique de terrain. Des logiciels de CAO et SIG tels qu'AutoCAD Map, Surfer, et ArcGIS fournissent des outils pour concevoir ce genre de diagrammes.

2.5.4 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle est un procédé consistant à simuler un environnement, en général au moyen d'un ordinateur, dans lequel on donne au sujet l'impression d'évoluer⁶⁰. L'utilisateur peut interagir avec l'environnement numérique 3D pour y naviguer ou le manipuler. Des dispositifs comme les visiocasques (*HMD, Head-Mounted Display*), les gants permettant de

⁵⁷ <http://www.mrn.gouv.qc.ca/territoire/geomatique/geomatique-vocabulaire.jsp>.

⁵⁸ <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/paysage/PaysageVoc.htm>.

⁵⁹ Pour des exemples, voir

http://cataloguesetra.documentation.equipement.gouv.fr/documents/dtrf/ti/ti_facsimile/dt/2500/DT2539.pdf.

⁶⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_virtuelle.

contrôler la simulation ou les systèmes de projection de type CAVE⁶¹ procurent à l'utilisateur l'impression d'être immergé dans la scène virtuelle.

L'utilisation de la visualisation numérique 3D est encore émergente en gestion paysagère et territoriale. Ces techniques commencent à concurrencer les méthodes infographiques de photomontage en projet paysager et paysage de projet, mais restent marginalement appliquées au paysage d'aménagement ou de territoire (voir section 1.3.4 pour la définition de ces catégories d'applications). Elles sont surtout utilisées pour les études auprès d'utilisateur et les analyses d'impact⁶².

Entre autres avantages, elles permettent de naviguer dans la maquette numérique du paysage, en sélectionnant les points de vue, les trajectoires et les panoramas. Une variété d'ambiances et d'éclairages peut être simulée. De plus, de nouveaux objets 3D (arbres, routes, bâtiments, etc.) sont facilement intégrables au décor. Il est aussi possible d'ajouter des sons à la simulation, ce qui s'avère très utile pour les études d'impact sur le paysage lors d'introduction d'équipement bruyant (par ex., des éoliennes). Cependant, l'influence des technologies de réalité virtuelle sur la perception de l'utilisateur est questionnée. Plusieurs experts craignent que les paysages numériques créés, en faisant perdre à l'observateur ses repères matériels, permettent de « truquer » la représentation et de manipuler la perception de l'observateur. De plus, la réalisation de représentations en réalité virtuelle nécessite souvent beaucoup de moyens techniques et financiers. Une étude plus détaillée du rôle des visualisations numérique des paysages peut être trouvée dans [JOLI05].

2.5.5 Réalité augmentée

La réalité augmentée regroupe les technologies permettant de superposer des objets virtuels 2D ou 3D dans des images de la réalité et ceci, en temps réel⁶³. Ces techniques alignent le mouvement des objets de synthèses dans les vues réelles pour donner l'impression qu'ils y sont complètement intégrés. Au moyen de différents dispositifs (lunettes, visiocasques, etc.), l'utilisateur peut interagir avec les objets virtuels dans des scènes réelles comme s'il s'agissait d'un seul environnement.

Un défi de ces techniques est d'assurer la synchronisation entre les informations réelles et simulées, en concordance avec la direction de regard de l'observateur. Dans ces conditions, la réalité augmentée produit des simulations plus réalistes et plus immersives que la réalité virtuelle. De plus, puisqu'elle se base en grande partie sur des images réelles, elle nécessite moins de modélisation et de rendu que la réalité virtuelle.

⁶¹ Le CAVE est un système de visualisation avancé de la grandeur d'une pièce. Il combine projection stéréoscopique et infographie 3D à haute résolution pour créer l'illusion d'être présent dans un environnement virtuel. Tiré de <http://vision.opto.umontreal.ca/Francais/virtuel.html>.

⁶² Pour un exemple de projet, voir [JALL06].

⁶³ http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_augment%C3%A9e.

Des applications de la réalité virtuelle émergent pour plusieurs domaines comme la chirurgie, l'inspection d'environnement dangereux et l'ingénierie. Certains projets en étudient le potentiel pour des applications extérieures, comme le design urbain et la gestion du paysage⁶⁴.

2.5.6 Exemples de systèmes d'imagerie expérimentaux pour l'analyse paysagère

Au Québec, la Chaire en paysage et environnement de l'Université de Montréal (CPEUM) explore les capacités des technologies d'imagerie pour la caractérisation et l'analyse de paysage. En collaboration avec des chercheurs en vision et imagerie, la CPEUM a développé deux systèmes expérimentaux utilisant des techniques d'analyse d'images.

- Système d'analyse informatique du paysage en mouvement (système de capture vidéo). Recherche portant sur la création d'un outil de caractérisation des paysages en mouvement (signature visuelle latérale) applicable à l'analyse des corridors autoroutiers. Partenaires: Chaire en paysage et environnement (CPEUM) et Laboratoire de Vision 3D (Université de Montréal).
- Système multifonctionnel d'interprétation et de monitoring intégré des paysages et de l'environnement (SIMIPE). Le système comprend un moteur de recherche de photographie de paysage par des caractéristiques du contenu visuel. Partenaires: Chaire en paysage et environnement (CPEUM), Équipe Vision et imagerie du CRIM, Fonds de diversification économique des régions (FDÉR), Conférence régionale des Élus de la Montérégie-Est.

⁶⁴ Voir [WANG07] et <http://www.tinmith.net/index.htm>.

3. ENJEUX ET DÉFIS

Cette section regroupe les commentaires des experts consultés sur les enjeux et défis touchant les technologies d'imagerie dans les quatre domaines d'application identifiés. Dans le but de conserver le plus possible l'originalité et l'intégralité des commentaires, nous n'avons fait qu'une édition minimale, tentant de les regrouper en trois classes : tendances, besoins et risques.

3.1 Observation de la Terre

- Tendances :
 - On note une croissance de la demande des consommateurs pour les données de télédétection.
 - La visualisation en 3D devrait remplacer les simples cartes et images 2D, particulièrement pour la clientèle dont la priorité est l'observation du bâti.
 - La nécessité d'améliorer le stockage, la distribution et l'utilisation des données de télédétection devrait être un accélérateur pour le développement d'applications⁶⁵.
 - Les technologies qui s'imposent sont : (1) le Lidar, mais il faudrait que les coûts baissent, (2) le Radar, qui pourra peut-être couvrir plus d'applications, entre autres pour la cartographie topographique, avec l'ajout de polarimétrie.
 - Deux marchés sont en croissance pour les données, produits et services en télédétection : la Chine et l'Inde.
 - Il existe une demande accrue pour de l'imagerie spatioportée de meilleure résolution et avec une plus grande couverture temporelle. L'utilisation de véhicules aériens sans pilote⁶⁶ devrait faire des percées pour des applications scientifiques et civiles. Ces véhicules permettent d'effectuer de plus longs vols, de jour, comme de nuit.
 - Les progrès des capteurs infrarouges permettront d'améliorer la sensibilité, la résolution, la réponse spectrale avec moins d'exigences de refroidissement.
 - La fusion des données de plusieurs senseurs permettra de créer une nouvelle information impossible à obtenir par chaque senseur individuel. Par exemple, l'imagerie radar sera combinée à l'imagerie optique.
 - Un effort sera déployé afin de miniaturiser les capteurs sans compromettre leur résolution et leur sensibilité.
 - Les systèmes commerciaux se distingueront surtout en offrant une meilleure résolution spectrale, voire même des données hyperspectrales.

⁶⁵ Tel que mentionné dans [GAIL07], le tsunami de 2004 en Indonésie qui a fait 200 000 morts était détectable, mais les moyens de communication n'étaient pas en place pour informer rapidement les décideurs et la population de la situation.

⁶⁶ En anglais, *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*.

- On devrait voir émerger des systèmes de télédétection « interactifs », c'est-à-dire de capteurs réagissant à des dispositifs introduits dans les milieux observés. Par exemple, l'insertion aux rejets industriels de marqueurs moléculaires pouvant être détectés par les capteurs à distance permettrait de suivre la pollution.
- Les réseaux de capteurs intelligents pouvant être programmés et reconfigurés en temps réel pour répondre aux besoins changeants des utilisateurs se développeront.
- Quelques applications porteuses pour la télédétection au Québec et au Canada sont: 1) l'agriculture de précision, 2) le suivi accru de la pollution de l'air et la détection des aérosols, 3) la surveillance de la qualité des eaux, 4) l'observation des océans, 5) l'analyse des bassins versants et l'étude de la pollution diffuse (ex : cyanobactéries), 6) les interventions d'urgence lors de sinistres.
- Besoins :
 - Des méthodes d'analyse des nouvelles données hyperspectrales et polarimétriques-interférométriques doivent être développées.
 - Pour le Lidar, quelques développements souhaitables sont :
 1. l'automatisation du classement des points (sol/non sol) ;
 2. l'automatisation de certains traitements pour la cartographie forestière : hauteur, nombre de tige/hectare, biomasse, distribution des hauteurs ;
 3. le développement d'outils de classification des unités de reliefs de sols (pour les modèles de terrain et d'écoulement).
 - Il y a eu des progrès dans les capteurs numériques pour l'imagerie haute résolution (ex : CCD de plus en plus grands). Ceci implique le développement d'algorithmes pour le traitement de ces images en haute résolution.
 - Le passage à l'imagerie aérienne numérique et couleur appelle pour le développement de CCD à la fois grand format et haute résolution. Les photos en format numérique motiveront l'automatisation des traitements. Actuellement, encore beaucoup d'analyses sont faites par des humains (ex : analyses stéréo 3D).
 - De la R-D sera nécessaire pour traiter et analyser les images Radar polarimétriques comme RADARSAT-2. Celles-ci serviront, par exemple, pour la caractérisation du microrelief (précision de l'ordre de 10 à 20 cm). Ces techniques s'avèreront utiles, entre autres, pour les modèles de terrain, d'écoulement et de bassins versants (en agroenvironnement et agriculture de précision).
 - Considérant l'augmentation des canaux (maintenant, 256 canaux et plus), l'efficacité des méthodes de traitement doit être améliorée.
 - Dans le cas des applications liées aux urgences (ex : sinistres, inondations, etc.) nécessitant intervention rapide, il est primordial de réduire le temps de traitement des données.
 - Une convergence des technologies s'impose: les techniques de télédétection doivent s'insérer dans un ensemble intégré de technologies (GPS, cellulaire, etc.). Elles doivent devenir portables et tendre vers le traitement en temps réel.

- La télédétection doit dépasser l'usage expert et scientifique et se destiner plus aux utilisateurs. De plus, le développement doit être orienté vers les applications.
 - On assiste à une démocratisation des technologies et données de télédétection, passant par un usage de plus en plus grand public. Les gens connaissent désormais les images numériques.. De plus en plus d'images de télédétection sont offertes gratuitement (par ex., sur Google Earth). Toutefois, les images haute résolution restent chères, hors de la portée des individus. Le prix élevé freine aussi l'utilisation (c'est le cas pour les agriculteurs). Certains experts arguent, que les données satellitaires devraient être gratuites et le profit plutôt réalisé sur les services. De plus, ils préconisent le logiciel libre pour l'exploitation et le traitement des données, dans le domaine de la télédétection.
 - D'autres experts croient qu'il faut encourager les regroupements régionaux pour favoriser l'acquisition de données géographiques en groupe, stimuler les échanges de données entre organismes et fournir du support aux ministères et organismes.⁶⁷
 - Il est important d'éduquer les utilisateurs potentiels aux applications des technologies d'imagerie pour la télédétection. Au Québec, l'offre de service des firmes cible surtout les grands utilisateurs (ministères, grandes entreprises, etc.). Pourtant, elle pourrait répondre aux besoins courants de petits utilisateurs (par exemple, les agriculteurs), mais ces derniers, bien souvent, ne connaissent pas les services de télédétection. Il faudrait que le gouvernement s'implique dans la promotion de ces technologies.
 - Il existe un besoin accru de récolter et traiter des données sur de grands espaces territoriaux. Par exemple, l'étude des réchauffements climatiques exige d'extraire la température sur des images. Aussi, la nouvelle économie du carbone nécessite de suivre la croissance des arbres et leur potentiel de captation du carbone.
- Risques :
 - Les coupures budgétaires opérées par les gouvernements et agences spatiales pour les programmes d'observation de la Terre mettent en péril l'épanouissement du secteur de la télédétection. Les entreprises privées jouent un rôle encore trop restreint dans le secteur de la télédétection.
 - La responsabilité des outils et données de télédétection est fragmentées entre de multiples organisations.
 - Les autorités gouvernementales sont trop réticentes à partager des données possiblement sensibles sur le territoire et les ressources naturelles et à en élargir l'accès.
 - Les dirigeants politiques manquent souvent de vision à long terme dans la planification des efforts à déployer en télédétection pour suivre adéquatement des

⁶⁷ Exemples de telles initiatives : Géomont en Montérégie (<http://www.geomont.qc.ca/>) et Latino en Outaouais (<http://www.latino.qc.ca/>)

enjeux environnementaux qui nécessitent parfois des décennies d'observation (p. ex., les changements climatiques).

- Un manque de consensus politique sur les ressources à investir dans l'observation de la Terre résulte en une inaction en ce domaine.
- Suite à trois décennies d'acquisition de données, l'arrêt de la couverture Landsat aux alentours de 2010 pourrait créer un vide important dont l'impact est difficile à prévoir.

3.2 Tri des matières résiduelles

- Tendances :

- La tendance dans le secteur de la récupération des matières résiduelles est de plus en plus à la collecte mélangée. Ceci implique une séparation des matières recyclables aux centres de tri.
- L'automatisation des chaînes de séparation des matières résiduelles et le tri optique sont plus répandus en Europe que sur le continent américain. Ces technologies commencent toutefois à percer dans les installations de tri en Amérique.
- Les systèmes de tri optiques ont démontré leur efficacité pour la classification automatique de différentes matières recyclables. Ils accélèrent le traitement et, selon le type d'application, ils atteignent des taux de précision élevés.
- L'analyse spectrale infrarouge (courtes longueurs d'onde, infrarouge moyen et proche infrarouge) et le recours aux spectromètres imageurs sont de plus en plus appliqués pour résoudre ce genre de problème. La réponse spectrale pouvant être directement reliée à la structure moléculaire d'un composé, elle permet une identification plus précise des matières.
- Il reste des marchés à développer pour les systèmes optiques de tri. Leur application au tri des débris de construction et démolition est encore marginale. Ces matériaux étant plus diversifiés et très gros, ils nécessitent des systèmes adaptés. Ils pourraient, par exemple, être très recherchés pour le tri du bois dans les régions nordiques, où le fonctionnement des systèmes traditionnels de tri par flottaison dans de grandes cuves peut être entravé par le gel⁶⁸.

- Besoins :

- Beaucoup d'étapes du tri se font encore manuellement. Cependant, les exigences de productivité et de sécurité pour les employés encouragent les établissements de traitement des matières recyclables à automatiser leurs processus.
- Pour étendre leur utilisation, les systèmes d'imagerie pour le tri des matières résiduelles se doivent d'atteindre des niveaux de qualité et de performance élevés.

⁶⁸ http://findarticles.com/p/articles/mi_m0KWH/is_5_43/ai_n13734268/pg_1.

Ils doivent permettre de réduire les impuretés dans les ballots produits et augmenter les capacités de traitement. Par exemple, l'élimination des morceaux de céramique dans les calcins de verre pose encore problème. Comme la céramique présente un point de fusion supérieur au verre, elle engendre des défauts dans le verre produit à partir de calcins recyclés.

- Pour stimuler le recyclage et en faire une industrie florissante, il faudrait que les produits et emballages soient conçus en fonction d'être recyclés. Ceci simplifierait les processus de tri et de transformation des matières résiduelles, augmenterait le taux de matières valorisables, assurerait des débouchés pour celles-ci et ferait croître la rentabilité du processus. L'essor de cette industrie stimulerait le développement de technologies de tri, dont les systèmes optiques.
- Risques :
 - Le coût est un facteur déterminant dans la décision d'acquérir un équipement de tri optique. Ce choix dépendra du type de matière traitée, du niveau de qualité de tri à atteindre et de la main-d'œuvre nécessaire pour y arriver. Un système de tri optique coûtant entre 150 000 \$ et 200 000 \$, la rentabilité en dictera l'achat.
 - Le développement des technologies d'imagerie pour le tri des matières résiduelles, comme toutes les technologies environnementales, dépendra beaucoup des normes fixées en matière de recyclage. Par exemple, l'Europe et le Japon ont adopté des lois obligeant les manufacturiers à reprendre et recycler les produits qu'ils vendent. Très peu d'états en Amérique se sont dotés de telles lois, freinant l'essor des entreprises de recyclage et, du même coup, les investissements dans les technologies pour cette fin.
 - Un obstacle à l'automatisation des chaînes de tri reste cependant qu'une grande part des matières recyclables sont envoyées dans des centres de tri en Inde et en Chine. Le prix très faible de la main-d'œuvre dans ces pays et les pratiques moins contrôlées pour assurer la sécurité des employés peuvent freiner l'implantation de systèmes automatisés mondialement.

3.3 Analyses environnementales en laboratoire

- Tendances :
 - Dans les applications émergentes pour les analyses environnementales en laboratoire au Québec, on note l'identification des algues bleu-vert (cyanobactéries) et l'identification de médicaments et cosmétiques dans l'eau. Pour le moment, ces problématiques sont traitées par des laboratoires publics tels que le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Les laboratoires privés n'offrent pas encore ce genre de tests, se concentrant plutôt sur les analyses de grand volume. Ce marché pourrait toutefois se développer.
- Besoins :

- La microscopie est la principale technologie d'imagerie appliquée aux analyses d'échantillons pour des fins environnementales. Bien que des systèmes de microscopie de plus en plus sophistiqués, intégrant caméras et ordinateurs, soient disponibles, l'automatisation des analyses reste à améliorer. Les logiciels possèdent des fonctionnalités de traitement permettant principalement d'améliorer la qualité des images, de segmenter les particules observées et de les dénombrer. Toutefois, pour le moment, les images d'échantillons sont souvent analysées par des humains. Le développement de méthodes de reconnaissance automatique d'échantillons serait souhaitable. Elle permettrait probablement de développer les services de tests de laboratoires effectués par microscopie.
- Il serait intéressant de développer de l'équipement d'analyse portable pouvant être amené sur les sites. Ceci permettrait d'effectuer les tests nécessaires directement in situ et d'obtenir les résultats plus rapidement.
- Risques :
 - En ce moment, la majeure partie des analyses environnementales faites en laboratoire sont de type physico-chimique. Elles servent à détecter les contaminants, analyser les rejets industriels, évaluer la qualité de l'air, de l'eau et des sols. De plus en plus automatisés, ces tests peuvent se faire en grand volume. Toutefois, la plupart des équipements utilisés à ces fins ne comportent pas de technologies d'imagerie. Mise à part la microscopie, l'application de l'imagerie et d'analyse d'image reste encore limitée dans ce secteur environnemental.

3.4 Analyses paysagères et planification environnementale

- Tendances :
 - Les méthodes établies par les experts en analyse paysagère sont contestées, car elles ne tiennent pas compte du regard du citoyen. À l'avenir, on pourrait davantage mesurer la perception de la population face au paysage. Ce genre d'étude pourrait stimuler l'émergence de technologies de rendu et visualisation mieux adaptées au paysage.
 - De toutes les technologies informatiques, les outils géomatiques sont probablement ceux qui sont le plus largement adoptés pour l'analyse paysagère et la gestion environnementale. La convergence des SIG et des techniques de visualisation 3D est très prometteuse pour ce domaine.
 - Les gens n'accordent pas de crédibilité à la réalité virtuelle, car ces techniques peuvent facilement tromper l'œil. Ils font plus confiance aux photomontages, jugés plus fidèles à la réalité. Il faudrait augmenter le réalisme des simulations et s'assurer qu'elles ne soient pas trompeuses. Sur ce plan, la réalité augmentée, mélangeant des images réelles et du contenu de synthèse aurait peut-être plus d'avenir que la réalité virtuelle pure.

- Le couplage de photomontage et de modèles produits par CAO offre une alternative avantageuse à la réalité augmentée en termes de coût et de moyens techniques.
- Besoins :
 - Il y a de plus en plus d'enjeux économiques liés au paysage et l'environnement : valorisation pour le tourisme, minimisation de l'impact dans le développement de nouvelles infrastructures, respect des réglementations dans ces grands projets. Les projets de développement susceptibles d'affecter l'environnement sont de plus en plus surveillés par la population. Celle-ci pourrait exiger plus de rigueur dans les analyses d'impact ce qui stimulerait le développement de méthodes de visualisation pour l'aménagement du paysage. Pour le moment, au Québec, le ministère de l'Environnement n'exige pas d'études d'impact visuel très poussées (un montage photo suffit).
 - La méthode d'étude de l'intérêt visuel du paysage est standard depuis 30 ans et repose sur des critères bien établis par les experts. L'automatisation de cette procédure dans un système expert répondrait à un besoin. Ceci nécessiterait de développer des méthodes logicielles pour l'extraction de l'information visuelle pertinente dans les images de paysages et pour la caractérisation paysagère. Un tel système pourrait, par exemple, procéder à l'identification des plans dans le paysage ou détecter le type de vue (ouverte ou fermée).
 - L'automatisation des traitements de photomontage serait souhaitable. Bien que des logiciels permettent de réaliser ce type de composition photographique, leur réalisation prend du temps. De plus, des technologies améliorant le réalisme des montages photo amélioreraient les analyses prospectives du paysage.
- Risques :
 - Bien qu'elles offrent un certain potentiel, l'utilisation des technologies informatiques en analyses paysagères est somme toute limitée. Cette situation découle probablement d'une certaine méconnaissance de ces outils par les experts du milieu. De plus, de nombreux spécialistes du paysage restent sceptiques quant à la capacité des outils informatiques à traduire les aspects sensibles, esthétiques, qualitatifs du paysage, car ces outils sont faits pour objectiver et systématiser des processus.
 - La réalité augmentée est applicable à l'étude d'impact en paysage. Cette technologie suscite un intérêt dans le domaine de l'analyse paysagère, mais reste peu utilisée, principalement parce qu'elle coûte cher.

4. QUELQUES DONNÉES DE MARCHÉ

La cueillette de données financières de marché spécifiques à l'imagerie dans un contexte environnemental, a été un exercice plus difficile que prévu probablement à cause de deux facteurs : (1) le point de vue inhabituel de regarder l'imagerie à travers la loupe de l'environnement et (2) le suivi financier quand même relativement nouveau du marché de l'environnement. Au moment de la rédaction, les données financières les plus récentes sur lesquelles nous avons pu mettre la main dataient de quelques années.

LE MARCHÉ MONDIAL DE L'ENVIRONNEMENT⁶⁹

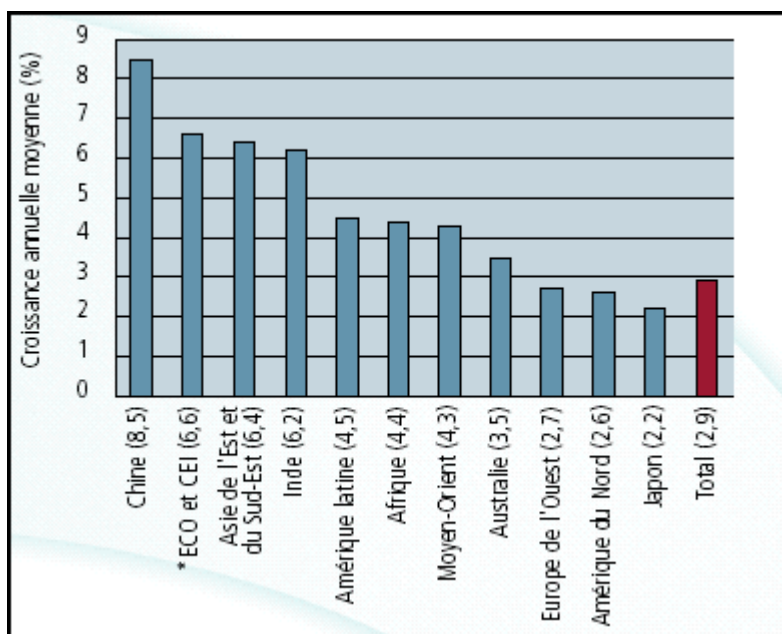
- Le marché mondial de l'environnement se chiffre à 800 milliards de dollars.
- Les facteurs stimulant la demande pour des technologies, services et produits environnementaux sont :
 - La prévention de la pollution, une production plus propre et l'écoefficacité.
 - La santé humaine et la qualité de vie.
 - La réglementation et les initiatives de financement public.
 - Les priorités gouvernementales, comme par exemple le Protocole de Kyoto.

Selon le « Global Environmental Markets and the UK Environmental Industry Opportunities to 2010 » publié en 2002. Les secteurs du marché mondial de l'environnement se répartissent ainsi :

- 49% pour la gestion des déchets
- 39% pour la gestion de l'eau et des eaux usées
- 6 % pour les services-conseils
- 3% pour les mesures correctives
- 3% pour l'énergie
- 2% pour la surveillance et les instruments de mesure
- 1% pour les technologies propres

Selon la même source, la croissance annuelle moyenne des marchés mondiaux de l'environnement entre 2000 et 2010 devait être plus grande pour la Chine, l'Europe centrale et orientale et la Communauté des États indépendants, et plus faible pour le Japon et l'Amérique du Nord. La répartition globale entre les différents groupes de pays est illustrée sur la Figure suivante.

⁶⁹ Information tirée de Stratégis Canada (<http://strategis.ic.gc.ca/epic/site/ea-ae.nsf/fr/ea02187f.html>), page web créée en 2005 et mise à jour en 2007



INDUSTRIE DE L'ENVIRONNEMENT AU QUÉBEC ET AU CANADA⁷⁰

- Évaluée à plus de 29 milliards de dollars, l'industrie canadienne de l'environnement représente près de 8 000 entreprises dont la valeur des exportations annuelles se chiffre à plus de 1,4 milliard de dollars. La majorité (93%) de ces entreprises compte moins de 100 employés.
- 21 % des entreprises canadiennes en environnement se retrouvent au Québec.
- Les entreprises canadiennes mettent au point des solutions novatrices dans nombre de domaines environnementaux, notamment :
 - Le traitement des eaux (rayonnement ultraviolet, biologie et systèmes à membrane, dessalement)
 - L'énergie propre (piles à combustible, petites centrales hydroélectriques, énergie éolienne, biomasse, énergie, solaire et thermique)
 - Les systèmes d'information géographique (instruments de mesure, surveillance, analyse et acoustique marine)
 - La gestion de l'environnement (logiciels et systèmes).
- Une étude produite en 2003 par Ægis Management Consulting Group pour Industrie Canada identifiait les secteurs suivants comme représentant les meilleures opportunités pour l'industrie canadienne en environnement dans les dix années suivantes⁷¹ :

⁷⁰ Information tirée de Strategis Canada (<http://strategis.ic.gc.ca/epic/site/ea-ae.nsf/fr/ea02187f.html>), page web créée en 2005 et mise à jour en 2007

- technologies de traitement de l'eau et des eaux usées ;
 - services d'expert-conseil en génie et en gestion (y compris la géomatique) ;
 - services des déchets (y compris la gestion des déchets solides, gestion et technologies des décharges, technologies de recyclage et récupération des ressources) ;
 - sources d'énergie renouvelable (y compris le vent, les sites de production solaire et les systèmes de contrôle, l'efficacité énergétique et la biomasse) ;
 - biens et services d'analyse (analyse des GES et surveillance des émissions, lutte contre la pollution atmosphérique) ;
 - technologies des piles à combustible ;
 - assainissement ;
 - gestion des ressources naturelles.
- Selon une enquête menée par Statistique Canada en 2002 qui présente un portrait général sur l'industrie de l'environnement au Québec et au Canada⁷² :
 - L'industrie canadienne de l'environnement se compose surtout de PME. On en recensait 7891 en 2002 dont 1680 au Québec. Les PME se sont avérées les principaux fournisseurs de biens et de services environnementaux (87 % de tous les revenus liés à l'environnement).
 - Les entreprises canadiennes ont perçu des revenus de 15,8 milliards de dollars en 2002 en rapport avec l'environnement, soit 8 % de plus qu'en 2000. À l'échelle du Québec, les revenus liés à l'environnement se sont élevés à 3,1 milliards de dollars.
 - Les revenus provenant des exportations de biens et de services environnementaux ont totalisé 1,4 milliard de dollars en 2002 pour le Canada, dont 257 millions de dollars pour le Québec. Les États-Unis ont constitué le plus grand marché d'exportation pour l'industrie canadienne de l'environnement, suivis de l'Europe et de l'Asie.
 - Le nombre total d'emplois des établissements commerciaux qui ont déclaré des revenus liés aux activités environnementales était de 159 720 en 2002, dont 32 437 au Québec.

OBSERVATION DE LA TERRE⁷³

- Les dépenses mondiales en produits de télédétection s'élevaient à plus de 7 milliards de dollars en 2006 et devraient atteindre 7,3 milliards de dollars en 2007.
- À un taux de croissance annuel composé de 6,3%, le marché devrait atteindre 9,9 milliards de dollars d'ici 2012.

⁷¹ Information tirée de Strategis Canada (<http://strategis.ic.gc.ca/epic/site/ea-ae.nsf/fr/ea02180f.html>).

⁷² Information tirée de Environnement Canada (http://www.gc.ec.gc.ca/dpe/Programme/industrie_f.asp) et donnant les chiffres les plus récents sur le marché de l'environnement.

⁷³ Information tirée de (<http://edablog.com/2007/06/06/remote-sensing>).

- Le secteur des prévisions météorologiques détient la plus grande part du marché, soit approximativement 38% du marché global
- Les dépenses pour les produits de télédétection destinées aux études sur les changements climatiques connaîtront un taux de croissance annuel composé de 4,5% d'ici 2012 et totaliseront 7% du marché.

Global Expenditures for Remote Sensing Products, By Application, Through 2012
(\$ Million)

Application	2006	2007	2012	2007-2012 CAGR%
Weather Forecasting	2,700	2,830	3,750	5.8
Right-Of-Way Inspections	1,000	1,010	1,200	3.5
Intelligence Gathering	510	545	798	7.9
Climate Change Studies	550	560	697	4.5
Public Health	397	402	675	10.9
Other Applications	1,866	1,940	2,788	7.5
Total	7,023	7,287	9,908	6.3

Source: BCC Research (Remote Sensing Technologies and Global Markets #IAS022A)

- La convergence des technologies de télédétection, de SIG et du GPS laissait espérer la naissance d'une nouvelle industrie forte pouvant dépasser les 30 milliards de dollars en ventes en 2005. Ces prédictions ne se sont pas avérées, n'atteignant que le sixième du montant anticipé.

TRI DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

- La quantité de rebuts collectés par les municipalités américaines a presque triplé depuis 1960, atteignant 245m tonnes en 2005. Dans les pays de l'ouest de l'Europe, la quantité de déchets municipaux a crû de 23% entre 1995 et 2003, s'élevant à 577 kg par personne.
- Les efforts de recyclage ont suivi l'accroissement de la production de déchets. Aux États-Unis, la proportion des matières résiduelles recyclées est passée de 9,6% en 1980 à 32% présentement. Cette tendance est encore plus marquée en Europe, où des pays comme l'Autriche et la Hollande recyclent plus de 60% des déchets municipaux.
- La politique québécoise de gestion des matières résiduelle 1998-2008 visait un objectif de récupération de 65% des matières résiduelles valorisables. En 2004, on en était à un

taux de récupération de 49%.⁷⁴ De 1988 à 2004, la quantité de matières résiduelles récupérées a quadruplé.

- Il existe de plus en plus de marchés pour les matières recyclées. Plusieurs matières, comme les métaux, valent cher et leur récupération devient rentable et profitable.
- Le nombre d'installations de récupération des matières résiduelles dans le monde est en croissance. Il en existe environ 2000 grandes dans le monde, dont 1500 sont situées en Europe et le reste aux États-Unis. Plusieurs autres plus petites usines sont réparties partout dans le monde⁷⁵.
- Les systèmes de tri optique coûtent entre 150K \$ et 200K \$.

⁷⁴ <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/MICI/BILAN2004/Fiche1B.pdf>.

⁷⁵ <http://www.machinevisiononline.org/public/articles/details.cfm?id=3189>.

BIBLIOGRAPHIE

ACTES DE CONFÉRENCES, COLLOQUES, ATELIERS

[JOLI05] Joliveau T. « Voir le monde comme il paraît ou les enjeux des visualisations réalistes dans la gestion territoriale » dans "Paysages & valeurs, de la représentation à la simulation", Colloque pluridisciplinaire international, Faculté des Lettres et Sciences humaines de Limoges, 2005.

[JALL06] Jallouli, J., Moreau, G. « La réalité virtuelle comme outil d'étude sensible du paysage : le cas des éoliennes », Premières journées de l'AFRV, Rocquencourt, pp. 39-46. Novembre 2006.

[WANG07] Wang, X., Chen, R. Gong, Y., Hsieh, Y.-T. "Experimental Study on Augmented Reality Potentials in Urban Design" in Proceedings of the 11th International Conference Information Visualization (IV'07), pp. 567-572. 2007.

[KOET05] Koetz, B., Morsdorf, F., Kneubühler, M., Itten, K., Allgöwer, B. "Concept for Forest Parameter Estimation Based on Combined Imaging Spectrometer and LIDAR Data" dans *Proceedings of the EARSeL 4th Workshop on Imaging Spectroscopy*, pp. 645-656, Avril 2005.

[BONI99] Bonifazi, G., Massacci, P. "Imaging Techniques for Process Optimization and Control in Glass Recycling" dans *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, Volume 1, Issue , vol 1, pp. 485 – 490, Juillet 1999.

PÉRIODIQUES, MAGAZINES

[CARL06] Carlsohn, M. F. « Spectral image processing in real-time », *Journal of Real-Time Image Processing*, 1 (1) Octobre 2006 : 25-32.

[GAIL07] Gail, W. B. « Remote sensing in the coming decade : the vision and the reality », *Journal of Applied Remote Sensing*, 1 (012505) Janvier 2007 : 19 p.

[GATN99] Gat, N. "Directions in Environmental Spectroscopy: Remote Sensing." *Spectroscopy Showcase Magazine*, March 1999.

[COHE04] Cohen, M. J., Ettenberg, M. H., "Machine Vision in the Shortwave Infrared , Advanced Imaging", March 2004. http://www.sensorsinc.com/downloads/article_0304.pdf

[SERR06] Serranti, S., Bonifazi, G. "Spectral culet classification in the mid-infrared field for ceramic glass contaminants detection", *Waste Management & Research*, 24 (1), 2006 : 48-59.

[OGAW03] Ogawa, M. Tani, K., Yamguchi, N., Nasu, M. "Development of multicolour digital image analysis system to enumerate actively respiring bacteria in natural river water". *Journal of Applied Microbiology*, 95, 2003 : 120-128.

THESE DE DOCTORAT, MEMOIRE DE MAITRISE

[AIKI01] Aikio, M. *Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph*. Finlande. VTT Technical Research Center of Finland et Département de génie électrique de l'Université de Oulu, 2001. Publications VTT 435.125 p. Thèse de doctorat en technologie. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P435.pdf>.

RAPPORTS TECHNIQUES ET PROPOSITIONS

[TUTO06] *Tutoriel : Notions fondamentales de télédétection*, Centre canadien de télédétection, 2006, 266 p. http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php.

[GAGN99] Gagnon, L., Lalonde, M. *Rapport de veille stratégique : Vision artificielle et traitement d'images*, Centre de recherche informatique de Montréal, 1999. 138 p.

[HERR98] Herrala, E. *SIMON : Spectral Imaging For On-line Sorting*, Spectral Imaging Ltd., Finlande, 1998. 13 p. http://www.zeutec.de/eng/mitte/akt/pdf/online_sorting_eng.pdf.

[STAT00] Statistique Canada. *Industrie de l'environnement, secteur des entreprises*, catalogue no 16F0008XIF, 2000.

[MDEI03] Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation du Québec. *La filière industrielle de l'environnement au Québec*, Juin 2003. 93 p. http://www.mdeie.gouv.qc.ca/page/web/portail/entreprises/service.prt?svcid=PUBLICATIONS1&page=details_publication.jsp&iddoc=43870.

[ZLAT02] Zlatanova, S. *Augmented Reality Technology*, Delft University of Technology, Delft, 2002, 77 p. (GISt Report No. 17).

Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation du Québec, Direction de l'environnement et des services aux entreprises. *Entreprises exportatrices du Québec en environnement : Des solutions innovatrices qui répondent à vos besoins, Répertoire 2007*, 2005, 172 p.

RÉFÉRENCES ÉLECTRONIQUES

(Tous les sites étaient actifs au 26 septembre 2007)

Ministère du Développement durable, environnement et parcs du Québec, *Glossaire*, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/glossaire.htm>.

Statistique Canada, *Le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) 2002 – Canada*, http://www.statcan.ca/francais/Subjects/Standard/naics/2002/naics02-menu_f.htm.

Notions de base sur les technologies d'imagerie

Wikipédia, *Spectre électromagnétique*, http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.

Smith, L. I., *A Tutorial on Principal Components Analysis*, http://csnet.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf.

Observation de la Terre

The European Earth Observation Web Site for Secondary Schools, <http://www.eduspace.esa.int/subtopic/default.asp?document=295&language=fr>.

ESA Tiger Initiative, <http://www.tiger.esa.int/training/Introduction-teledetection.pdf>.

Wikipedia, *Earth observation satellites*, http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Earth_observation_satellites.

Basly, B., *Téledétection pour la qualité de l'air en milieu urbain*, http://tel.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=34da113609708b960dfc0e2b42b5d88a&view_this_doc=tel-00006291&version=1.

Christina, C., *Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale*, http://www.inra.fr/ea/sources/index.php?page=detail_these&id=206&PHPSESSID=2a2b54a0372d4379a28f3cf3e78179a5.

Sullivan, D., Shaw, J., Mask, P., Rickman, D., Luvall, J., Wersinger, J., *Remote sensing of near-surface soil properties with the airborne terrestrial application sensor*, http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?SEQ_NO_115=166766.

Nanni, M. R., Demattê, J. A. E., *Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis*, <http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/70/2/393>.

GEOinfo, *Un nouveau portrait satellite global de la forêt du Québec et du Canada accessible sur le Web*,
<http://www.quebecgeographique.gouv.qc.ca/approfondir/bibliotheque/geoinfo/geoinfo-fevrier-2007.asp>.

Thirsk, B., *Technologies spatiales*,
<http://www.espacepourlesespeces.ca/technologiesspatiales/index.htm>.

Bellamy, R., *La surveillance des récifs de corail par satellite*, http://www.idrc.ca/fr/ev-5569-201-1-DO_TOPIC.html.

GÉOinfo, *La télédétection sur les traces du caribou*,
<http://www.quebecgeographique.gouv.qc.ca/approfondir/bibliotheque/geoinfo/pdf/juin02.pdf>.

Agence spatiale canadienne, *Télédétection hyperspectral : Application en exploration minérale*, http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/hyper_geologie.asp.

Agence spatiale canadienne, *Télédétection hyperspectral : Application en foresterie*,
http://www.space.gc.ca/asc/fr/satellites/hyper_foresterie.asp.

Gail, W.B., *Bright future for remote sensing?*, <http://spie.org/x15006.xml>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Application de la télédétection à la pêche*, <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0355F/T0355F07.htm>.

Sauvage, L. et al., *Un réseau national de télédétection active pour l'observation des aérosols trophosphériques*,
http://aei2004.dt.insu.cnrs.fr/contributions/posters/p26_sauvage_reseau_affiche_maj2.ppt.

Ouboulo.com, *L'analyse de l'air*, <http://www.oboulo.com/analyse-air-17536.html>.

Boissé, S., *L'hiver est fini, vivement l'hiver prochain!*,
http://www.usherbrooke.ca/liaison_vol41/n18/a_royer.html.

Académie de Créteil, *Comprendre les images MÉTÉOSTAT*, http://www.ac-creteil.fr/svt/Teledec/M910201/cc_ana.htm.

Météo France, *Télédétection*,
http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/1206_curieux_view.jsp.

American Society Of Agronomy, *Is Remote Sensing The Answer To Today's Agriculture Problems? Wheat Growers Turn To Aerial Imagery To Overcome Economic, Environmental Challenges*,

<http://www.sciencedaily.com/releases/2003/01/030116073943.htm>.

<http://www.inra.fr/internet/Directions/DIC/ACTUALITES/DOSSIERS/DOC/agrip/dosap8a11.pdf>.

Baret, F., *Potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision*,

<http://extension.missouri.edu/explore/envqual/eq0453.htm>.

MDA, *Benefits of Earth-observation Data to the Agricultural Industry*,

<http://gs.mdacorporation.com/rsic/agriculture/agri.asp>.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, *Expertise du Québec en matière territoriale*, <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/territoire/expertise/index.jsp>.

I-Space, *Imagerie et environnement*, http://www.i-space.fr/applic_imagerie.htm.

Aménagement de la faune, seconde édition, *Chapitre 5 : Télédétection et aménagement de la faune*, <http://www.bf.refer.org/faune/chapitre5.html>

Analyses environnementales en laboratoire

Webiologie, <http://webiologie.free.fr/techniques/microscopie>.

Wikipédia, *Microscopy*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Microscopy>.

University of Oklahoma, *Microscopy: Techniques*,

<http://www.ou.edu/research/electron/www-vl/techniqu.shtml>.

Wikipedia, *Optical microscope*, http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_microscope.

Wikipédia, *Microscope à fluorescence*,

http://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_%C3%A0_fluorescence.

Microscopies.com, *Stéréomicroscopie*,

<http://www.microscopies.com/DOSSIERS/Magazine/Articles/DNardin-Stereomicroscopie-1/Stereomicroscopie-1.htm>.

Wikipedia, *Confocal laser scanning microscopy*,

http://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_laser_scanning_microscopy.

Unité Mathématiques et Informatiques Appliquées de l'INRA, *L'imagerie en microscopie confocale*, http://w3.jouy.inra.fr/unites/miaj/public/imaste/Projets/AI2M_v2/node8.html.

Imaging Technology Group of University of Illinois, *Microscopy suite Software*,
<http://www.itg.uiuc.edu/ms/software/>.

CIME, *Software for Electron Microscopy : Visualization & Image Analysis*,
http://cimewww.epfl.ch/EMYP/comp_vis.html.

NCI ETI Branch Flow Cytometry Core Laboratory, *Links to flow and image cytometry-related companies*, <http://home.ncifcrf.gov/ccr/flowcore/corplink.htm>.

Wikipédia, *Cytométrie en flux*, http://fr.wikipedia.org/wiki/Cyтом%С3%A9trie_en_flux.

Stanford Shared FACS Facility, *CellQuest Software Reference Manual*,
<http://facs.stanford.edu/sff/doc/vanfordcellquestuserguide.pdf>.

Horizon Scientific Press, *Flow Cytometry for Research Scientists: Principles and Applications : Chapter Abstracts*, <http://www.horizonpress.com/hsp/abs/absflo.html>.

Amnis, *ImageStream system*, <http://www.amnis.com/>.

Compucyte, *iColor™ Fluoro-Chromatic Imaging Cytometer*,
<http://www.compucyte.com/icolor.htm>.

Fuxion Biosciences, *CytoFlux imaging cytometer*,
<http://www.fluxionbio.com/products/cytoflux.html>.

CNRC, *Liens d'intérêt*, http://imaging-imagerie.nrc-cnrc.gc.ca/links_f.html.

CNRC, *Installations d'imagerie du CNRC*, http://imaging-imagerie.nrc-cnrc.gc.ca/facilities_f.html.

Ecotoxique.com, *Définition de l'écotoxicologie*, <http://www.ecotoxique.com/ecotoxdef.htm>.

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), *Méthodes d'analyses biologiques, microbiologiques et toxicologiques*,
http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/bio_toxico_micro.htm.

Bouchareine, P., *Spectrométrie optique*,
<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16802373>.

Tri des matières résiduelles

Machine Vision Online, *Machine Vision Enables Fast and Accurate Recycling*,
<http://www.machinevisiononline.org/public/articles/details.cfm?id=3189>.

Zuec, N., *Machine Vision for Pellet Sorting in Recycled Plastics*,
<http://www.machinevisiononline.org/public/articles/articlesdetails.cfm?id=2938>.

Wrap, <http://www.wrap.org.uk/>.

The Economist, *The truth about recycling*,
http://www.economist.com/science/tq/displaystory.cfm?story_id=9249262.

Recycling Today, *RECYCLING TODAY'S PLASTICS RECYCLING CONFERENCE: Sorting Technology Update*, <http://www.recyclingtoday.com/news/news.asp?ID=9957>.

Wikipédia, *Spectrographe*, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrographe>.

VTT, *On-line Color Measurement – TATU*,
http://www.vtt.fi/palvelut/cluster1/topic1_7/optical_sensors_ref_200602.jsp?lang=en.

Specim, *ImSpector Imaging Spectrographs*,
<http://www.channelsystems.ca/Attachments/ImSpector/ImSpector-Brochure.pdf>.

Mogensen, *Tri colorimétrique*, http://www.mogensen.de/fra/farbsortierung_allgemein.htm.

National Instruments, *NI Machine Vision Provides a Cost-Effective Plastic Sorting System*,
<http://sine.ni.com/csol/cds/item/vw/p/id/718/nid/124100>.

Gubeno, J., *Opting for optical: MRF operators are taking a more serious look at optical sorting technology to improve the quality of their end products and to reduce labor costs*,
http://findarticles.com/p/articles/mi_m0KWH/is_5_43/ai_n13734268/pg_1.

EPIC, *Plastics Automated Optical-Sorting Technologies*,
http://www.cpia.ca/files/files/files_one_pager_on_automated_sorting.pdf.

Lofti, A., *Recycling*, <http://www.lotfi.net/recycle/>.

DV Tecnologia d'Avanguardia, *Hisvim*,
<http://www.dvoptic.com/spectroscopy/applications/hispim.html>.

Machine Vision News, *Modern machine vision improves identification of empty beverage containers in the reverse vending systems*,
<http://www.automaatioseura.fi/jaostot/mvn/mvn5/bevesys.html>.

Technologies clés 2010, *Automatisation du tri des déchets*,
http://www.industrie.gouv.fr/techno_cles_2010/html/ener_41.html.

Vision Systems Design, *Infrared imaging aids recycling*,
http://vsd.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE_ID=249974&KEYWORDS=IR%20Cameras&p=19&pc=ENL.

ControlDesign.com, *See and sort see-through plastics*,
<http://www.controldesign.com/articles/2006/155.html>.

Analyses paysagères

Joliveau, T. *Voir le monde comme il paraît ou le rôle des visualisations réalistes dans la gestion territoriale*, <http://perso.orange.fr/thierry.joliveau/Biblio/Limoge2005Joliveau.pdf>.

Joliveau, T. *Analyse des paysages dans un contexte d'aménagement. L'intérêt des outils géomatiques*, <http://perso.orange.fr/thierry.joliveau/Biblio/Geoevenement%202003.pdf>.

Michelin, Y., *Lectures d'un territoire*, <http://www.enfa.fr/agriculture/Ressources/articles/mediation/Michelin-Paysage.htm>.

Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer - La Documentation des Techniques Routières Françaises, *Le bloc-diagramme paysager : un outil d'analyse spatiale pour l'aménagement du territoire*,
http://cataloguesetra.documentation.equipement.gouv.fr/documents/dtrf/ti/ti_facsimile/dt/2500/DT2539.pdf.

Wikipédia, *Réalité virtuelle*,
http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_virtuelle.

Laboratoire de psychophysique et perception visuelle (Université de Montréal), *Le CAVE*,
<http://vision.opto.umontreal.ca/Francais/virtuel.html>.

Wikipédia, *Réalité augmentée*,
http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9alit%C3%A9_augment%C3%A9e.

Tinmith AR system, <http://www.tinmith.net/index.htm>.

ANNEXE – LE MILIEU

Nous dressons ici la liste de quelques centres de recherche, organismes publics/privés, entreprises et utilisateurs impliqués au niveau de l'imagerie dans un contexte environnemental. Nous sommes conscients que cette liste est loin d'être exhaustive et nous nous excusons d'emblée envers ceux qui ne se retrouvent pas sur cette liste, soit par manque de temps pour la cueillette de données ou simple oubli. Nous serons heureux de recevoir toute information complémentaire qui nous permettrait de mettre à jour cette liste pour une diffusion ultérieure sur le site Web du CRIM.

Bien que n'étant pas spécifiquement lié à une des quatre catégories d'applications traitées dans ce rapport, il vaut la peine de souligner que l'organisme Enviro-Accès maintient un portail riche donnant plusieurs liens à des organismes et entreprises en environnement (<http://www.enviroaccess.ca/links-fr.html>).

OBSERVATION DE LA TERRE

On dénombre environ 2 000 compagnies en géomatique au Canada, dont 200 au Québec. Il s'agit, pour la plupart, de petites entreprises de moins de 10 employés. Au Québec, il y a peu d'entreprises du secteur qui oeuvrent dans le développement logiciel, la majorité se concentrant plutôt sur les services géomatiques. Dans l'Ouest canadien, plus d'entreprises oeuvrent dans le développement de systèmes de télédétection.

Le Québec et le Canada sont de grands utilisateurs de télédétection, en raison du vaste territoire qu'ils couvrent et l'abondance des ressources naturelles qu'ils doivent gérer. La surveillance des feux de forêts, des côtes et du grand nord constituent des enjeux importants.

Observation de la Terre
Centres de recherche
CARTEL, Université de Sherbrooke (http://www.usherbrooke.ca/cartel)
Département des sciences géomatiques, Université Laval (http://www.scg.ulaval.ca)
Department of Geomatics Engineering, Université de Calgary (http://www.geomatics.ucalgary.ca)
Department of Geomatics and Geodesy Engineering, Université du Nouveau-Brunswick (http://gge.unb.ca/HomePage.php3)
GEIGER, Université du Québec à Montréal (http://www.geo.uqam.ca/recherche/geiger_f4.htm)
Organismes publics et privés

Observation de la Terre
Le réseau GEOIDE, Université Laval (http://www.geoide.ulaval.ca)
Centre canadien de télédétection (http://www.ccrs.nrcan.gc.ca)
Agence spatiale canadienne (http://www.space.gc.ca/asc/index.html)
Association québécoise de télédétection (http://www.laqt.org)
Consortium Ouranos (http://www.ouranos.ca)
IRDA (http://www.irda.qc.ca/accueil.html)
Entreprises
Viasat GeoTechnologies (http://www.viasat-geo.com/fra/index.asp)
Groupe Alta (http://www.groupealta.com)
MIR Télédétection (http://www.mirteledetection.com)
Synetix (http://www.synetix.ca)
Envirosat (http://www.envirosat.com/pages/intropag.html)
Technologies Softmap (http://www.softmaptech.com/introduction_fr.html)
Géo-3D (http://www.geo-3d.com)
CLC-Camint (www.clc-camint.com)
Sigisco (http://www.sigisco.com)
Utilisateurs
Ministère des Ressources naturelles et de la faune (Québec).
Ministère des Transports (Québec)
Ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs (Québec)
Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation (Québec)
Sécurité civile
Ministère de l'Environnement (Canada)
Agriculture Canada

TRI DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

Tri des matières résiduelles
Entreprises
Lubo USA (http://www.lubousa.com)
General Kinematics (http://www.generalkinematics.com)
McCloskey International (http://www.mccloskeyinternational.com)
Mogensen (http://www.mogensen.co.uk)
CommoDas (http://www.commodas.de/holding/homepage/main.html)
MSS Inc. (http://www.magsep.com)
S&S Inspection Limited (http://www.sesotec.co.uk)
RTT (http://www.unisort.com)
Pellenc (http://www.pellenc.com.au)
Inspection Systems Ltd. (http://www.digitalinspection.co.uk/index.htm)
Waterfall Solutions (http://www.waterfallsolutions.co.uk/portfolio/m_vision)
Bevesys (http://www.bevesys.fi/english/index.html)
Machinex (http://www.machinex.ca/fr/index2.htm)
Sherbrooke OEM (http://www.sherbrooke-oem.com)
Averna Vision & Robotics Inc. (http://www.averna.com)
Waste Management (http://www.wmcanada.com/Cust_Service/recycling.asp)

ANALYSES ENVIRONNEMENTALES EN LABORATOIRE

Les universités possèdent presque toutes des départements en analyses environnementales en laboratoire. Elles sont principalement orientées vers la recherche en environnement et non le suivi environnemental.

Analyses environnementales en laboratoire
Centres de recherche
Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement (http://www.inrs-ete.quebec.ca)
INRS - Institut Armand-Frappier (http://www.iaf.inrs.ca)

Analyses environnementales en laboratoire
Centre de recherche en toxicologie de l'environnement (TOXEN) (http://www.er.ugam.ca/nobel/toxen)
Centre de recherche interdisciplinaire sur la santé, la biologie, la société et l'environnement (CINBIOSE) (http://www.cinbiose.ugam.ca/)
Réseau d'imagerie du CNRC (http://imaging-imagerie.nrc-cnrc.gc.ca/main_f.html)
Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) (http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/centre/index.htm)
Centre des technologies environnementales, Environnement Canada (http://www.etc-cte.ec.gc.ca)
IRB (http://www.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca)
Entreprises⁷⁶
Bede Scientific (www.bede.com)
Carl Zeiss, Inc. (http://www.zeiss.com)
Empix (http://www.empix.com)
GE Healthcare ART Explore Optix (http://www.gehealthcare.com/user/fun_img/pcimaging/products/expoptix.html)
Leica Microsystems : http://www.leica-microsystems.com/ .
LSM Technologies (http://www.lsmtech.com)
Nanonics Imaging Ltd. (http://www.nanonics.co.il)
Olympus Microscopy Resource Center (http://www.olympusmicro.com)
Physical Electronics, Inc. (http://www.phi.com)
Sutter Instruments (http://www.sutter.com/products/imaging.html)
PANalytical (http://www.panalytical.com)
Bruker (http://www.bruker.com)
JEOL (http://www.jeol.com)
Hitachi High Technologies (http://www.hitachi-hitec.com/oversea)
Horiba Jobin-Yvon (http://www.jobinyvon.com)

⁷⁶ http://imaging-imagerie.nrc-cnrc.gc.ca/links_f.html.

Analyses environnementales en laboratoire

Nikon Corporation Instruments Company (<http://www.nikon-instruments.jp/eng/index.aspx>)

Clemex (<http://www.clemex.com>)

ANALYSES PAYSAGÈRES ET PLANIFICATION ENVIRONNEMENTALE

Les utilisateurs des technologies d'imagerie dans ce domaine sont surtout des experts en aménagement du territoire : bureaux d'étude, ingénieurs, architectes, urbanistes, spécialistes de la foresterie, etc.

Analyses paysagères et planification environnementale

Centres de recherche

CPEUM, Université de Montréal (<http://www.paysage.umontreal.ca>)

Cemagref (<http://www.cemagref.fr>)

Entreprises

VizStudio (<http://www.vizstudio.ca/fr/default.aspx>)

Opus environnement (<http://www.opusenvironnement.com>)

Paysage & Environnement + Architecture (<http://www.paysage.fr/index.html>)

AEPI (<http://www.aepi.biz>)

Utilisateurs

Hydro-Québec

Ministère des Transports du Québec (MTQ)

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP)

Ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR)

Ministère de la Culture, des Communications et de la Condition féminine (MCCCF)