

Université du Québec  
INRS-ETE

**La télédétection comme source de données pour le modèle de  
simulation agroenvironnemental AnnAGNPS**

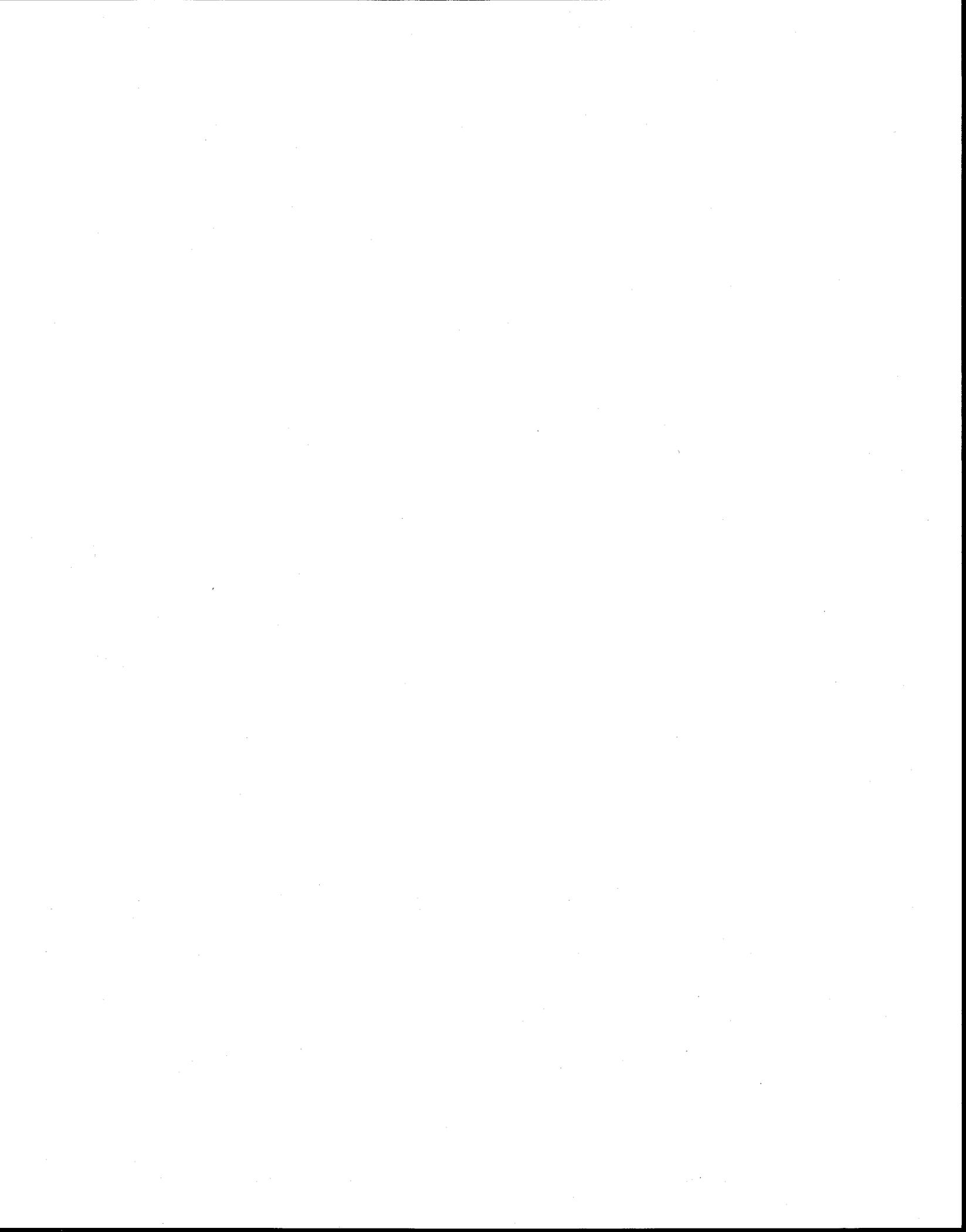
Par  
Jean-François Dolbec  
B.Sc.A. (Sciences Géomatiques, option génie)

Mémoire présenté  
pour l'obtention  
du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe	Goze Bertin Béné, professeur FLSH Université de Sherbrooke
Examineur interne	Monique Bernier, professeur INRS-ETE Université du Québec
Directeur de recherche	Daniel Cluis, professeur INRS-ETE Université du Québec
Codirecteur de recherche	Ferdinand Bonn, professeur FLSH Université de Sherbrooke

Mars 2005



## Remerciements

Mes remerciements les plus sincères sont d'abord exprimés à mon directeur de recherche, M. Daniel Cluis pour son appui, sa confiance envers moi, sa disponibilité et son soutien financier sans quoi ce mémoire n'aurait pu voir le jour. Je tiens à remercier mon co-directeur de recherche, M. Ferdinand Bonn pour ses conseils judicieux lors de nos quelques rencontres toujours très bénéfiques à l'avancement de mes travaux. Une merci tout particulier à M. André Lavoie, coordonnateur du projet OSMEDAL, qui a toujours été disponible, patient et qui m'a offert un soutien moral en plus de partager ses connaissances et son expérience dans le domaine de la télédétection. Son aide a été d'une grande utilité tout au long du projet.

Je voudrais remercier Frédéric Henry, stagiaire à l'INRS-ETE, pour ses cinq mois de travail sur le projet OSMEDAL qui ont assurément profité à mes travaux. Je dois également exprimer ma gratitude envers toute l'équipe du laboratoire de télédétection de l'INRS-ETE dirigé par Mme Monique Bernier qui m'a gracieusement permis l'utilisation de leurs équipements informatiques et leurs logiciels. Merci aussi à M. Yves Gauthier qui a su donner de son temps pour répondre à mes questions particulièrement au début de la recherche.

Je tiens à remercier tous mes collègues étudiants de l'INRS-ETE, Laurent, Julie L'H., Seb, Marie-Josée, Julie C., Marc-André, Annie, Annick, Fred qui ont rendu très agréables ces deux années passées.

Une pensée particulière va à Carole, Jean et Jérôme. Enfin, merci à toi, Véro pour ta présence dans ma vie.



## Résumé

L'intensification de l'agriculture observée durant ces dernières années au Québec a entraîné des problèmes de pollution diffuse majeurs à la grandeur du territoire agricole. Les effets négatifs de cette forme de pollution se sont éventuellement fait sentir sur les cours d'eau sillonnant les terres affectées de plusieurs régions du Québec. La dégradation de la qualité de l'eau de ces rivières a des répercussions graves sur la qualité et la diversité de la faune et de la flore aquatique. Dans la région de Chaudières-Appalaches, la rivière Boyer, un cours d'eau où la pollution diffuse a été observée, confirme malheureusement le caractère préoccupant de cette pollution. La Boyer a effectivement été abandonnée par la majorité de sa population d'éperlans arc-en-ciel ainsi que plusieurs autres espèces de poisson.

Dans le but de mieux comprendre les phénomènes liés à la pollution diffuse d'origine agricole, les modèles de simulation agroenvironnementaux constituent des outils puissants et efficaces. Pour cette raison, l'INRS-ETE a utilisé le modèle AnnAGNPS sur le bassin versant de la rivière Boyer et un de ses sous-bassins : la Boyer Nord.

Ce projet de maîtrise a pour objectif principal d'évaluer les capacités de la télédétection pour identifier l'occupation du sol dans le but d'alimenter le modèle de simulation agroenvironnemental AnnAGNPS sur le bassin versant de la Boyer Nord. Il s'agit d'examiner la pertinence du recours à la télédétection pour obtenir des intrants servant au modèle lesquels sont obtenus traditionnellement par d'autres moyens (entrevues auprès des agriculteurs). Pour ce faire, deux sources d'images sont comparées, soit celles provenant du capteur ASTER de Terra et celles acquises par le capteur ETM+ du satellite Landsat-7. De plus, deux méthodes de classification d'images sont analysées, à savoir la méthode de classification floue par objet et la méthode du maximum de vraisemblance. Par la suite, le développement d'un protocole géomatique permet le transfert des données classifiées vers le modèle. Enfin, les sorties des simulations sont formatées afin de pouvoir les visualiser et les consulter dans un environnement SIG. De cette façon, les résultats des simulations sont géoréférencés sur l'ensemble du bassin versant de la Boyer Nord ce qui en facilite leur analyse.

Les résultats obtenus démontrent que la télédétection constitue une alternative intéressante et prometteuse aux enquêtes terrain afin d'identifier l'occupation du sol sur le bassin versant de la Boyer Nord. Il faut cependant tenir compte de certaines contraintes. L'utilisation du capteur ASTER semble justifiée et comparable à l'emploi du capteur Landsat-7 ETM+ dans un contexte d'identification de l'occupation du sol d'un territoire à vocation agricole. Finalement, la recherche a révélé que la méthode de classification floue par objet s'avère efficace et puissante par rapport à la méthode du maximum de vraisemblance.



# Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé .....	v
Table des matières .....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xv
1 INTRODUCTION .....	1
2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
2.1 Pollution diffuse d'origine agricole .....	5
2.1.1 Définitions .....	5
2.1.2 Causes et conséquences .....	6
2.2 AnnAGNPS.....	7
2.3 Travaux antérieurs à l'INRS-ETE.....	9
2.4 Télédétection .....	11
2.4.1 Définition .....	11
2.4.2 L'utilisation de la télédétection dans le contexte agricole .....	11
2.4.3 Outils.....	12
2.4.4 Méthodes de classification et défis d'application dans un contexte agricole	13
2.4.4.1 Théorie entourant les méthodes de classification.....	13
2.4.4.2 Classification par maximum de vraisemblance.....	15
2.4.4.3 Classification floue par objet.....	17
2.4.4.4 Défis des classifications dans un contexte agricole .....	21
2.5 Synthèse .....	23
3 DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE ET DES CAPTEURS SATELLITAIRES UTILISÉS	25
3.1 Description du territoire.....	25
3.1.1 Description du bassin versant de la rivière Boyer.....	25
3.1.1.1 Profil physique.....	25
3.1.1.2 Profil environnemental .....	28
3.1.2 Description du bassin versant de la Boyer Nord.....	29
3.1.2.1 Profil physique.....	29
3.1.2.2 Profil environnemental .....	31
3.2 Description des capteurs satellitaires .....	31

3.2.1 ASTER.....	31
3.2.1.1 Caractéristiques de l'orbite d'ASTER .....	32
3.2.1.2 Caractéristiques spectrales et spatiales du capteur ASTER .....	32
3.2.1.3 Les applications d'ASTER.....	34
3.2.2 LANDSAT-7 ETM+ .....	34
3.2.2.1 Caractéristiques de l'orbite de Landsat-7 .....	35
3.2.2.2 Caractéristiques spectrales et spatiales du capteur ETM+.....	35
3.2.2.3 Les applications de Landsat-7 ETM+ .....	36
4 DÉMARCHE SCIENTIFIQUE .....	39
4.1 Aspect de la télédétection .....	41
4.1.1 Acquisition des images.....	41
4.1.1.1 Images ASTER et Landsat-7 ETM+ .....	41
4.1.1.2 Autres images .....	42
4.1.2 Prétraitements .....	43
4.1.2.1 Sélection des bandes à traiter .....	43
4.1.2.2 Transformations géométriques .....	45
4.1.2.3 Transformations radiométriques .....	48
4.1.2.4 Autres prétraitements .....	51
4.1.3 Classification .....	52
4.1.3.1 Définition des classes thématiques .....	53
4.1.3.2 Classification floue par objet.....	57
4.1.3.3 Classification par maximum de vraisemblance.....	61
4.1.3.4 Classification AnnAGNPS.....	62
4.1.4 Comparaison des images ASTER et Landsat-7 ETM+ .....	63
4.2 Transfert des résultats de la télédétection vers le modèle AnnAGNPS .....	65
4.2.1 Analyse des données et choix des informations exploitables .....	65
4.2.2 Croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales .....	66
4.2.2.1 Identifications des données requises .....	66
4.2.2.2 Mise à jour de la base de données et création d'indices exploitables...	67
4.2.2.3 Croisement des données.....	67
4.2.3 Intégration des données dans le modèle AnnAGNPS.....	69
4.2.4 Comparaison de l'occupation du sol obtenue par télédétection et par enquête sur le terrain.....	71

4.2.4.1 Occupation du sol au niveau des cellules AnnAGNPS.....	71
4.2.4.2 Occupation du sol au niveau des parcelles .....	71
4.2.5 Simulations AnnAGNPS .....	72
5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	73
5.1 Résultats .....	73
5.1.1 Résultats des classifications .....	73
5.1.1.1 Image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 .....	74
5.1.1.2 Image ASTER du 23 juin 2000 .....	81
5.1.2 Résultats de la comparaison des images ASTER et Landsat-7 ETM+ .....	85
5.1.2.1 Résultats moyens de la comparaison entre capteurs.....	86
5.1.2.2 Résultats par bande de la comparaison entre les capteurs .....	88
5.1.2.3 Résultats comparatifs des profils linéaires de chaque capteur .....	90
5.1.3 Résultats du transfert des données de classifications vers le modèle AnnAGNPS.....	91
5.1.3.1 Fichiers parcellaires et cellulaires résultants du croisement des données .....	91
5.1.3.2 Comparaison de l'occupation du sol obtenue par télédétection et enquête terrain .....	92
5.1.4 Résultats des simulations AnnAGNPS .....	98
5.1.4.1 Sorties totales mensuelles à l'exutoire .....	99
5.1.4.2 Qualité et quantité d'eau dans les tronçons de la Boyer Nord .....	100
5.1.4.3 Contribution des cellules.....	101
5.2 Discussion.....	102
5.2.1 La télédétection permet-elle d'obtenir des informations adéquates concernant l'occupation du sol en vue de remplacer les entrevues traditionnellement effectuées auprès des agriculteurs?.....	102
5.2.2 Les images ASTER constituent-elles une alternative intéressante et justifiée aux images Landsat-7 ETM+? .....	107
5.2.3 La méthode de classification floue par objet est-elle avantageusement comparable à la méthode de classification par maximum de vraisemblance?....	109
6 CONCLUSION.....	113
RÉFÉRENCES .....	119
ANNEXE A Orthophotographies et images aéroportées .....	125

ANNEXE B Projection MTM .....	131
ANNEXE C Transformations géométriques .....	135
ANNEXE D Analyse de l'occupation du sol .....	139
ANNEXE E Création du fichier vectoriel.....	147
ANNEXE F Critère de décision eCognition.....	151
ANNEXE G Indices de qualité .....	159
ANNEXE H Bases de données agroenvironnementales.....	163
ANNEXE I Fichier vectoriel des cellules AnnAGNPS.....	167
ANNEXE J Tables de correspondance.....	171
ANNEXE K Fichier d'édition et applications VB .....	175
ANNEXE L Résultats des simulations AnnAGNPS.....	189

## Liste des figures

Figure 2.1 : Limites de classes selon la méthode par maximum de vraisemblance (inspiré de Caloz et Collet, 2001) .....	16
Figure 2.2 : Paramètres de segmentation du logiciel eCognition .....	19
Figure 3.1 : Situation géographique du bassin versant de la rivière Boyer .....	26
Figure 3.2 : Sous-bassins versants de la rivière Boyer .....	27
Figure 3.3 : Bassin versant simulé de la rivière Boyer Nord .....	30
Figure 4.1 : Diagramme résumant visuellement la démarche scientifique du projet... ..	40
Figure 4.2 : Espace spectral occupé par les bandes des capteurs ASTER et Landsat-7 ETM+ (inspiré de Adams et al., 2002) .....	45
Figure 4.3 : Diagramme du processus de classification pour les images ASTER et Landsat-7 ETM+.....	53
Figure 4.4 : Données vectorielles du bassin de la Boyer Nord.....	58
Figure 4.5 : Processus de croisement des données (inspiré de Henry, 2004 : 17) .....	68
Figure 5.1 : Segmentation de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 4, 5 et 7).....	74
Figure 5.2 : Fusion des zones forestières de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 4, 5 et 7) .....	74
Figure 5.3 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 2 classes de cultures .....	75
Figure 5.4 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 4 classes de cultures .....	75
Figure 5.5 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 pour le modèle AnnAGNPS (Classification AnnAGNPS).....	76
Figure 5.6 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 2 classes de cultures .....	77
Figure 5.7 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 4 classes de cultures .....	77
Figure 5.8 : Segmentation de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 3, 4 et 6) .....	81
Figure 5.9 : Fusion des zones forestières de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 3, 4 et 6).....	81

Figure 5.10 : Classification floue par objet de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 2 classes de cultures .....	82
Figure 5.11 : Classification floue par objet de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 4 classes de cultures .....	82
Figure 5.12 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 2 classes de cultures .....	83
Figure 5.13 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 4 classes de cultures .....	83
Figure 5.14 : Intervalles de valeurs des réflectances et valeurs moyennes pour les bandes de l'image du 19 juillet 2001 prise par le capteur Landsat-7 ETM+ .....	86
Figure 5.15 : Intervalles de valeurs des réflectances et valeurs moyennes pour les bandes de l'image du 19 juillet 2001 prise par le capteur ASTER.....	86
Figure 5.16 : Écarts types des moyennes des réflectances pour les bandes des images du 19 juillet 2001 prises par les capteur Landsat-7 ETM+ et ASTER .....	87
Figure 5.17 : bande 3 .....	88
Figure 5.18 : bande 2 .....	88
Figure 5.19 : bande 4 .....	88
Figure 5.20 : bande 3 .....	88
Figure 5.21 : bande 5 .....	89
Figure 5.22 : bande 4 .....	89
Figure 5.23 : bande 7 .....	89
Figure 5.24 : bande 6 .....	89
Figure 5.25 : Profil des réflectances des pixels de la ligne 207 pour les deux capteurs (L : Landsat-7 EMT+, A : ASTER) .....	90
Figure 5.26 : Carte parcellaire suite à l'étape de croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales .....	91
Figure 5.27 : Carte cellulaire suite à l'étape de croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales .....	92
Figure 5.28 : Carte cellulaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain avec tous les codes de gestion AGNPS .....	93
Figure 5.29 : Carte cellulaire des occupations du sol dérivées de la télédétection.....	93
Figure 5.30 : Carte comparative des occupations du sol au niveau cellulaire avec les données obtenues par enquêtes terrain et les données de télédétection.....	93

Figure 5.31 : Carte cellulaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain suite à la reclassification des codes de gestion AGNPS.....	95
Figure 5.32 : Carte cellulaire des occupations du sol dérivées de la télédétection ....	95
Figure 5.33 : Carte comparative des occupations du sol au niveau cellulaire avec les données obtenues par enquêtes terrain reclassifiées et les données de télédétection	95
Figure 5.34 : Carte parcellaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain suite à la reclassification des codes de gestion AGNPS.....	97
Figure 5.35 : Carte parcellaire des occupations du sol dérivées de la télédétection...	97
Figure 5.36 : Carte comparative des occupations du sol au niveau parcellaire avec les données obtenues par enquêtes terrain et les données de télédétection.....	97
Figure 5.37 : Quantité de sédiments en suspension à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord.....	99
Figure 5.38 : Concentration des sédiments en suspension dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain .....	100
Figure 5.39 : Concentration des sédiments en suspension dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection .....	100
Figure 5.40 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en azote (absorbé et soluble) à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain .....	101
Figure 5.41 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en azote (absorbé et soluble) à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données de télédétection .....	101
Figure 5.42 : Fonctionnement de l'assignation du contenu des cellules AnnAGNPS selon les parcelles (tiré d'Henry, 2004) .....	104
Figure 5.43 : Exemple de l'effet de lignage sur la classification par maximum de vraisemblance introduit par la bande 6 du capteur ASTER .....	110
Figure A.1 : Centroides des orthophotographies .....	127
Figure D.1 : Répartition graphique de la superficie des cultures occupant les champs des agriculteurs interrogés, exprimée en pourcentage pour l'année 1999.....	141
Figure D.2 : Répartition graphique de la superficie des cultures occupant les champs des agriculteurs interrogés, exprimée en pourcentage pour l'année 2000.....	143
Figure H.1 : Structure de la base de données agroenvironnementale originale .....	165
Figure H.2 : Structure de la nouvelle base de données agroenvironnementale .....	165
Figure I.1 : Bassin simulé de la Boyer Nord découpé selon les cellules AnnAGNPS....	169

Figure K.1 : Structure du fichier créé par l'éditeur d'AnnAGNPS (AnnAGNPS Input Editor) (les codes de gestion AGNPS sont encadrés en rouge) .....	177
Figure L.1 : Volume de ruissellement d'eau à l'exutoire du bassin versant de la Boyer Nord .....	191
Figure L.2 : Quantité d'azote à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord .....	192
Figure L.3 : Quantité de phosphore à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord .....	192
Figure L.4 : Quantité d'eau parcourant les tronçons durant la simulation avec les données des enquêtes terrain .....	193
Figure L.5 : Quantité d'eau parcourant les tronçons durant la simulation avec les données de télédétection .....	193
Figure L.6 : Concentration d'azote absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain .....	194
Figure L.7 : Concentration d'azote absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection .....	194
Figure L.8 : Concentration de phosphore absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain .....	195
Figure L.9 : Concentration de phosphore absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection .....	195
Figure L.10 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en sédiments en suspension à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain .....	196
Figure L.11 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en sédiments en suspension à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données de télédétection .....	197
Figure L.12 : Charge moyenne en sédiments en suspension exportée annuellement des cellules du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain .....	197
Figure L.13 : Charge moyenne en sédiments en suspension exportée annuellement des cellules du bassin selon la simulation avec les données de télédétection .....	197

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Sous-catégories de paramètres d'entrées pour le modèle AnnAGNPS.....	9
Tableau 2.2 : Quelques algorithmes de classification pour l'approche pixel (1 <sup>er</sup> degré) et leurs caractéristiques correspondantes (d'après Bonn et Rochon, 1992) .....	15
Tableau 3.1 : Caractéristiques spatiales, spectrales et radiométriques du capteur ASTER (Yamaguchi et al., 2001) .....	33
Tableau 3.2 : Caractéristiques spatiales, spectrales et radiométriques du capteur ETM+ de Landsat-7 .....	36
Tableau 4.1 : Images acquises .....	42
Tableau 4.2 : Caractéristiques de la réduction uniforme des images géoréférencées..	48
Tableau 4.3 : Éclairement solaire moyen au niveau du satellite ASTER .....	51
Tableau 4.4 : Identifiants des cultures suite à l'enquête auprès des agriculteurs (1999-2000).....	54
Tableau 4.5 : Codes de gestions AGNPS établis par Chardonneau (2000).....	55
Tableau 4.6 : Définition de classes thématiques avec 4 classes de cultures .....	56
Tableau 4.7 : Définition de classes thématiques avec 2 classes de cultures .....	57
Tableau 4.8 : Paramètres de segmentation .....	59
Tableau 4.9 : Définition de classes thématiques de la classification AnnAGNPS .....	63
Tableau 4.10 : Caractéristiques du patron servant à la réduction uniforme des images du 19 juillet 2001 .....	64
Tableau 5.1 : Statistiques qualitatives des classifications de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 .....	78
Tableau 5.2 : Matrice de confusion de la classification floue par objet AnnAGNPS de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999.....	78
Tableau 5.3 : Erreurs d'omission et de commision de la classification floue par objet AnnAGNPS de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999.....	78
Tableau 5.4 : Statistiques qualitatives des classifications de l'image ASTER du 23 juin 2000 .....	84
Tableau 5.5 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.30 .....	93
Tableau 5.6 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.33 .....	95
Tableau 5.7 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.36 .....	97
Tableau A.1 : Images comprises dans la mosaïque selon les lignes de vol.....	129

Tableau C.1 : Données concernant la précision de la transformation géométrique de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999.....	137
Tableau C.2 : Données concernant la précision des transformations géométriques de l'image ASTER du 23 juin 2000.....	137
Tableau D.1 : Analyse de l'occupation du sol des parcelles connues par entrevues en fonction de leur superficie pour l'année 1999.....	142
Tableau D.2 : Analyse de l'occupation du sol des parcelles connues par entrevues en fonction de leur superficie pour l'année 2000.....	144
Tableau D.3 : Analyse de l'occupation du sol des cellules AnnAGNPS en terme de superficie pour l'année 1999.....	145
Tableau F.1 : Courbes de fonction d'appartenance utilisables dans eCognition .....	153
Tableau F.2 : Critères de décision appliqués lors de la classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999.....	156
Tableau F.3 : Critères de décision appliqués lors de la classification floue par objet de l'image ASTER du 23 juin 2000.....	157
Tableau J.1 : Table permettant de transférer les codes SIG en codes de gestion AGNPS .....	173
Tableau J.2 : Table permettant de reclassifier les codes de gestion AGNPS du fichier de cellules original pour qu'ils correspondent au fichier de cellules issu de la classification .....	174

# 1 INTRODUCTION

---

Le monde agricole québécois a évolué de façon remarquable ces dernières décennies. Cette évolution s'est traduite par le développement d'exploitations agricoles plus vastes, plus concentrées géographiquement et, surtout, plus productives que jamais auparavant. Ces transformations dans l'agriculture, la plus importante des activités du secteur primaire au Québec, ne sont malheureusement pas sans conséquences sur la santé des écosystèmes avoisinants tant aquatiques que terrestres. La dégradation des cours d'eau situés dans des bassins versants où l'agriculture occupe une superficie prépondérante vient confirmer l'impact négatif sur l'environnement lié à l'intensification de l'agriculture. En effet, cette intensification entraîne dans de nombreux cas des problèmes de pollution diffuse d'origine agricole.

La pollution diffuse d'origine agricole conduit inévitablement vers une accélération de l'eutrophisation des cours d'eau traversant les terres cultivées. L'augmentation de concentration du phosphore, de l'azote et des sédiments en suspension a des conséquences nuisibles sur la faune et la flore aquatique. La rivière Boyer, située dans la région de Chaudière-Appalaches, en est un bien triste exemple. Ce cours d'eau a longtemps été reconnu pour sa population abondante d'éperlan arc-en-ciel. Il était ainsi possible de pêcher et de se baigner dans la Boyer jusqu'à la fin des années soixante-dix. Toutefois, les pressions agricoles ont entraîné une détérioration notoire de la qualité de l'eau de la rivière. La forte concentration de sédiments en suspension a ainsi causé le colmatage du fond du lit de la rivière qui était composé de gravier et qui constituait un environnement indispensable à la reproduction de l'éperlan. Celui-ci, comme une dizaine d'autres espèces de poisson, a déserté la rivière. Les riverains ont eux aussi renoncé à se baigner dans le cours d'eau.

Pour mieux comprendre la problématique de la pollution diffuse d'origine agricole, plusieurs équipes du Québec ont focalisé leurs études sur le bassin versant de la Boyer dont l'équipe de l'INRS-ETE qui travaille depuis quelques années à modéliser les phénomènes reliés à cette forme de pollution. Pour ce faire, cette équipe fait appel au modèle états-unien de simulation agro-environnemental AnnAGNPS (Young et al., 1989). Pour faire fonctionner le modèle et pour évaluer son efficacité, une vaste

campagne terrain a été réalisée sur une période de 2 ans (1998-1999, 1999-2000). Lors de cette campagne, des données ont été recueillies à divers niveaux : météorologiques, hydrologiques, de la qualité de l'eau, de l'occupation du sol, de la gestion des fertilisants, des travaux aux champs, etc. Cette campagne s'est révélée fastidieuse étant donné la nature et l'éventail très étendu des informations nécessaires au fonctionnement du modèle AnnAGNPS.

Suite à ce processus de récolte d'information, un questionnement s'est posé concernant les méthodes employées pour obtenir les données recherchées. Est-il possible d'obtenir certaines informations essentielles au modèle AnnAGNPS d'une façon plus simple et plus rapide? Cette problématique cadre dans le projet général, nommé OSMEDAL, qui englobe les travaux de recherches présentés dans ce document.

Le projet « Observation Spatiale et Modélisation des sources d'Érosion et de pollution Diffuse dans les bassins versants Alimentant les Lacs » (OSMEDAL), regroupe plusieurs chercheurs provenant des milieux universitaires, publics et privés. Le projet repose sur un financement du CRSNG. L'objectif principal du projet est de rendre plus fiables les observations spatiales des sources d'érosion et de pollution diffuse, pour être en mesure de mieux dresser un bilan de l'état actuel d'un bassin versant et d'en faire le suivi. Pour atteindre cet objectif, les outils privilégiés dans le projet sont les images satellitaires, les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles de simulation hydrologique et agro-environnemental.

L'objectif général du présent travail consiste à évaluer les capacités de la télédétection pour identifier l'occupation du sol dans le but d'alimenter le modèle de simulation agroenvironnemental AnnAGNPS.

De façon plus spécifique, trois objectifs sont poursuivis dans ce travail :

- Évaluer la pertinence de l'usage des images ASTER par rapport aux images LANDSAT-7 ETM+;

- Comparer l'intérêt de l'utilisation de la méthode de classification floue par objet vis-à-vis la méthode du maximum de vraisemblance dans le contexte d'identification culturelle;
- Développer une méthodologie pour intégrer les résultats de classification dans le modèle AnnAGNPS.

En relation avec l'objectif général et avec les objectifs spécifiques, trois hypothèses sont à vérifier :

- La télédétection permet d'obtenir des informations adéquates concernant l'occupation du sol et d'ainsi remplacer les entrevues traditionnellement effectuées auprès des agriculteurs.
- Les images ASTER constituent une alternative intéressante et justifiée aux images LANDSAT-7 ETM+.
- La méthode de classification floue par objet est avantageusement comparable à la méthode de classification du maximum de vraisemblance.

La suite de ce mémoire se divise en sept grandes parties. Tout d'abord, le chapitre 2 présente une revue de littérature relativement à la pollution diffuse et sa modélisation ainsi que sur les aspects de la télédétection qui s'y rattachent. Ensuite, le chapitre 3 est consacré à la description du site d'étude et des capteurs satellitaires utilisés. Puis, la méthodologie du projet est exposée au chapitre 4 suivie du chapitre 5 qui fait état des résultats et de la discussion. Finalement, la dernière partie (chapitre 6) est consacrée aux conclusions.



## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

---

Cette section a pour but d'exposer, par le biais d'une revue de la littérature, la problématique de la pollution diffuse, la solution offerte par le modèle de simulation AnnAGNPS et l'apport possible de la télédétection dans la modélisation des phénomènes reliés à la pollution diffuse d'origine agricole. En premier lieu, une définition de la pollution diffuse est présentée. En deuxième lieu, l'historique, la structure et le fonctionnement du modèle AnnAGNPS sont décrits. En troisième lieu, les travaux antérieurs de l'INRS-ETE, qui ont servi de base au présent projet, sont exposés. En quatrième et dernier lieu, la télédétection et les méthodes de classification sont définies et leurs avantages et défis dans un contexte d'identification de l'occupation du sol sont abordés.

### 2.1 Pollution diffuse d'origine agricole

#### 2.1.1 Définitions

Deux classes de pollution des eaux de surface sont généralement distinguées : la pollution ponctuelle et la pollution diffuse. La pollution ponctuelle est caractérisée par des sources de pollution locales, habituellement repérables et quantifiables. Ces sources sont souvent de type industriel ou domestique et leurs effets sur les eaux de surface se font sentir immédiatement. L'impact de la pollution ponctuelle est donc facilement évalué et son éradication est directe. La gestion de la pollution diffuse est quant à elle plus complexe.

En ce qui a trait à la pollution diffuse, Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, du bassin Rhône-Méditerranée-Corse<sup>1</sup> propose une définition détaillée de ce phénomène :

« Pollution des eaux due non pas à des rejets ponctuels et identifiables, mais à des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis aux milieux aquatiques de façon indirecte, par ou à travers le sol, sous l'influence de la force d'entraînement des eaux en provenance des

---

<sup>1</sup> [http://www.environnement.gouv.fr/rhone-alpes/bassin\\_rmc/rdbrmc/glossaire/Poldif.htm](http://www.environnement.gouv.fr/rhone-alpes/bassin_rmc/rdbrmc/glossaire/Poldif.htm)

précipitations ou des irrigations. Les pratiques agricoles sur la surface cultivée peuvent être à l'origine de pollutions diffuses par entraînement de produits polluants dans les eaux qui percolent ou ruissellent ».

En résumé, la pollution diffuse résulte d'une multitude de sources d'émission de polluants qui sont dispersés aléatoirement sur de vastes surfaces et qui se retrouvent dans les eaux suite à divers phénomènes physiques, chimiques et biologiques.

### **2.1.2 Causes et conséquences**

La pollution diffuse en milieu agricole est principalement reliée à l'apport en éléments nutritifs provenant de l'épandage d'engrais de ferme. Comme le soulignent Lavoie, Nolin et Sasseville (1995), l'essor des élevages intensifs et leur concentration géographique ont engendré des situations où, localement, la quantité de fumiers et de lisiers produits dépasse la capacité de réception des terres agricoles disponibles pour l'épandage. Ainsi, le dépassement de cette capacité entraîne inévitablement un transport de certaines substances vers les eaux de surface et les eaux souterraines. Cette capacité de réception est influencée par une quantité importante et variée de facteurs incluant les besoins nutritifs des cultures, la quantité et la nature des engrais épandus, le moment et le mode d'épandage et les propriétés du sol, pour n'en nommer que quelques-uns (Lavoie et al., 1995).

Quant aux substances potentiellement polluantes pour la ressource « eau », ce sont l'azote, le phosphore, les particules fines de sols érodés et les organismes pathogènes. Les conséquences qu'engendre chaque polluant sont très différentes. En trop grande quantité, l'azote sous forme ammoniacale augmente le pH des cours d'eau. Le phosphore sous diverses formes accélère l'eutrophisation des eaux de surface en favorisant la prolifération des plantes aquatiques qui réduisent par le fait même la quantité d'oxygène disponible dans l'eau. Les phénomènes de ruissellement et d'érosion transportent des particules du sol et d'autres substances dans les cours d'eau augmentant leur turbidité et limitant la pratique d'activités récréatives (Lavoie et al., 1995). Enfin, les organismes pathogènes sont susceptibles d'entraîner des maladies tant chez l'humain que chez les animaux.

La pollution diffuse d'origine agricole a longtemps été considérée comme négligeable et moins dommageable pour l'environnement que la pollution ponctuelle. Cette dernière est beaucoup plus facilement identifiable et ses impacts sont pratiquement immédiats. Les recherches des dernières années ont toutefois démontré que la pollution diffuse est un phénomène important et responsable de la détérioration de la qualité de l'eau dans les bassins versants du Québec et d'ailleurs (Patoine et Simoneau, 2002; Gangbazo et al., 2002; Lavoie et al., 1995; Corwin et Wagenet, 1996; Basnyat et al., 2000). Selon des chiffres rapportés par Corwin et Wagenet (1996), 30 à 50 % de la surface terrestre serait affectée par la pollution diffuse.

## 2.2 AnnAGNPS

Dans le but de comprendre, quantifier et spatialiser les phénomènes reliés à la pollution diffuse d'origine agricole, les modèles de simulation s'avèrent des outils puissants et profitables. S'inspirant du dicton « Mieux vaut prévenir que guérir », ils permettent d'entrevoir des conséquences dommageables pour l'environnement sous certaines conditions et ainsi mieux agir pour éviter ces effets néfastes. De cette façon, ils favorisent une gestion optimale et saine des ressources au point de vue environnemental. De plus, l'utilisation d'un modèle peut remplacer partiellement ou entièrement la mise en place d'études de terrain qui sont souvent coûteuses, exigeantes en instrumentation et qui s'étalent sur plusieurs années (Tim et Jolly, 1994). L'observation et la modélisation sont donc devenues au fil des ans, des instruments complémentaires utilisés pour l'analyse des problèmes de pollution diffuse d'origine agricole (Preti, 1996).

Conçus selon des fondements empiriques ou exploitant les éléments finis, les modèles dits « agroenvironnementaux » sont variés. Tous développés dans le but de prédire l'impact de l'agriculture sur la qualité des eaux de surface, les modèles AGNPS, CREAMS, ANSWERS et SWAT (Landry, 1998) sont les plus fréquemment mentionnés dans la littérature.

Le modèle AnnAGNPS, acronyme de « Annualized Agricultural Non-Point Source pollution », a été développé aux États-Unis dans le Laboratoire National de Sédimentation (National Sedimentation Laboratory) d'Oxford au Mississippi. AnnAGNPS

constitue la nouvelle version continue du modèle AGNPS, son prédécesseur. Le modèle AGNPS est un modèle de simulation épisodique qui a été développé durant les années 80 par l'équipe de Young (Young et al., 1989) du Service de la recherche agricole (ARS) du département de l'agriculture des États-Unis (USDA). De son côté, AnnAGNPS permet la simulation en continu dans le temps de la pollution diffuse d'origine agricole à l'échelle du bassin versant. Le modèle calcule et répertorie la production, le transport et l'exportation des sédiments, nutriments et pesticides de même que le ruissellement en réponse à des événements climatiques relativement aux conditions de terrain et à leur évolution selon les activités agricoles (Proulx et al., 2002). Pour ce faire, AnnAGNPS s'appuie sur l'équation universelle révisée de perte de sol « RUSLE », Revised Universal Soil Loss Equation (Renard et al., 1991) et sur la méthode du « SCS Curve Number ».

Le modèle consiste en une série de programmes permettant une simulation continue sur une ou plusieurs années complètes, avec un pas de temps journalier (Chardonneau, 2000). Le bilan peut être calculé à l'exutoire ou en tout point du bassin étudié. De plus, AnnAGNPS intègre une modélisation de la contribution de la fonte de neige sur les processus menant à la pollution agricole diffuse. Cependant, le modèle nécessite une importante quantité de paramètres d'entrée, ce qui en limite l'utilisation particulièrement sur les bassins versants de superficie supérieure à 200 km<sup>2</sup>. Ces données d'entrée sont regroupées sous trois grands types de données : les caractéristiques physiques du bassin versant synthétique, les paramètres relatifs à l'occupation et à la gestion du territoire et les données climatiques (Proulx et al., 2002). Le tableau 2.1 montre les sous-catégories incluses dans le type de données relié aux paramètres d'occupation et de gestion du territoire. Les sous-catégories comprennent elles-mêmes des sous-classes qui ne sont pas explicitées dans ce tableau étant donné leur grand nombre. Entre parenthèse, on retrouve le nombre de paramètres contenus dans ces sous-catégories et qui ont été employés lors de l'étude (Proulx et al., 2002). Par ailleurs, le modèle est une boîte noire : les étapes de calculs effectuées entre l'alimentation du modèle avec les intrants et les données de sortie sont ainsi inconnues (Chapon, 2002).

Tableau 2.1 : Sous-catégories de paramètres d'entrées pour le modèle AnnAGNPS

Type de données d'entrée	Sous-catégories
Paramètres relatifs à l'occupation et à la gestion du territoire	Identification du fichier (9)
	Paramètres de la période de simulation (37)
	Paramètres des cellules (22)
	Paramètres reliés aux champs (45)
	Paramètres reliés aux tronçons (37)
	Paramètres reliés à d'autres composantes du bassin (4)
	Paramètres de référence (84)
Paramètres reliés aux sorties (37)	

La structure spatiale d'AnnAGNPS découle du modèle hydrologique Topaz (Garbrecht et Martz, 1999) qui est un module intégré dans AnnAGNPS. Topaz permet de générer un réseau hydrographique complet ainsi que le découpage d'un bassin versant en sous-bassins versants à partir d'un modèle numérique d'altitude. Il est possible de fixer certains paramètres qui guident Topaz dans sa création de sous-bassins versants. Ainsi, la surface critique de drainage et la longueur minimale d'un tronçon sont déterminées par l'utilisateur. Les sous-bassins versants calculés par Topaz constituent les cellules d'AnnAGNPS.

Le logiciel est très accessible du fait qu'il est entièrement gratuit et facilement téléchargeable à partir du site Internet du « National Sedimentation Laboratory »<sup>1</sup>.

### 2.3 Travaux antérieurs à l'INRS-ETE

Le présent projet s'inscrit dans la suite logique des travaux entamés en 1998 et poursuivis jusqu'en 2002 par les différents étudiants, stagiaires et post-doctorants qui ont œuvré à l'INRS-ETE. Ainsi, de nombreuses données récupérées de ces travaux ont permis la réalisation de ce projet. De plus, le savoir-faire développé par ces

<sup>1</sup> <http://www.sedlab.olemiss.edu/AGNPS.html>, le présent projet utilise la version AnnAGNPS2001.

chercheurs et diffusé à travers différents ouvrages est considéré et mis à contribution à divers niveaux. Un bref retour historique et une présentation des données liées à ces travaux et exploitées dans le projet actuel s'imposent.

Les données ont principalement été acquises et rassemblées lors de travaux effectués dans le cadre d'une subvention concertée FCAR-IRDA visant l'application du modèle conceptuel AnnAGNPS à la problématique de la contamination diffuse d'origine agricole telle qu'elle se manifeste sur le bassin versant expérimental de la rivière Boyer (Proulx et al., 2002).

De 1998 à 2000, des données hydrométriques, de qualité de l'eau et météorologiques ont été prises sur le bassin versant de la rivière Boyer et le sous-bassin de la rivière Boyer Nord. Durant la même période, Pomares (Chardonneau, 2000) a effectué une collecte majeure de données auprès des agriculteurs du bassin versant de la Boyer Nord concernant leurs pratiques culturales à l'échelle de la parcelle, notamment sur la fertilisation, les opérations aux champs et le type de cultures qu'ils exploitaient. De plus, lors des entretiens, les agriculteurs ont repéré leurs différents lots sur une carte cadastrale et ont indiqué les découpages des lots en parcelles. Par la suite, Chardonneau (2000) a regroupé ces informations en créant une base de données agricole pour le territoire de la Boyer Nord. Il a aussi effectué les premières simulations avec le modèle AnnAGNPS98. En 2001, Landry (2001) a spatialisé les données recueillies par Pomares à l'aide d'outils géomatiques et de cartes provenant du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (maintenant le Ministère de l'Environnement du Québec) et du ministère de l'Agriculture (maintenant le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec). Ces travaux sont malheureusement peu documentés mais il semble qu'un jeu de données vectorielles ait été créé à partir de la numérisation des cartes obtenues des ministères et de la carte cadastrale modifiée par Pomarès suite aux entrevues des agriculteurs. Pour ce faire, le système d'information géographique (SIG) ArcView de la compagnie ESRI<sup>1</sup> a été utilisé. Durant cette même année, Racine (2001) a effectué les premières simulations avec le modèle AnnAGNPS2001 sur le bassin versant de la rivière Boyer.

---

<sup>1</sup> ESRI, [www.esri.com](http://www.esri.com)

Proulx et al. (2002) ont ensuite appliqué AnnAGNPS2001 au sous-bassin versant de la Boyer Nord après avoir réalisé une révision en profondeur des paramètres d'entrée du modèle.

## **2.4 Télédétection**

La télédétection est la technologie privilégiée dans le projet pour remplacer les méthodes traditionnelles de collecte de données dans le but d'alimenter le modèle agro-environnemental AnnAGNPS. Il est donc indispensable de se pencher sur la définition de la télédétection, la nature des outils entourant cette technologie et les défis généraux et propres au projet qui risquent d'être rencontrés.

### **2.4.1 Définition**

Le Centre Canadien de Télédétection<sup>1</sup> définit la télédétection comme la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application ces données. Cette technique suppose l'acquisition d'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn et Rochon, 1992). Les images et les mesures sont obtenues à partir de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Dans le cadre de la présente étude, les plates-formes de type spatial ont été favorisées et leurs caractéristiques sont présentées en détail dans la section 3.2.

### **2.4.2 L'utilisation de la télédétection dans le contexte agricole**

Pour le producteur agricole, des informations comme l'identification des cultures, leur état de santé, l'humidité du sol, le stade de croissance des plantes et les infestations d'insectes sont primordiales afin d'appliquer une gestion efficace et équilibrée de ses terres. Les images satellitaires sont de plus en plus utilisées pour l'identification de l'occupation du sol et des cultures et la télédétection s'impose de façon grandissante

---

<sup>1</sup> CCT, <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>

comme technique de gestion dans le monde de l'agriculture (Abou El-Magd et Tanton, 2003). Ainsi, les données de télédétection ont prouvé leur utilité devant de nombreux défis d'observation et de suivi agricole. Que ce soit pour l'identification des espèces végétales ou pour l'estimation de la densité du couvert végétal, l'évaluation du rendement des champs ou, encore, pour l'observation de la croissance et du développement végétatif, la télédétection s'est avérée une technique efficace et pertinente (voir à ce sujet la revue de littérature de Lelong et al., 1998).

De nombreux autres acteurs dans les sphères de l'agriculture ont recours à la télédétection comme technique d'acquisition d'information et comme outil de gestion. Par exemple, certains ministères font appel aux images satellites et aux logiciels de traitement d'images pour dresser un inventaire des types de cultures pratiquées dans des régions données et pour obtenir de l'information sur la structure et la santé de la végétation. Les compagnies d'assurance quant à elles peuvent évaluer les dégâts causés aux cultures à la suite de catastrophes naturelles en utilisant la télédétection. Enfin, certains chercheurs (Moulin et al., 1998) ont allié avec relativement de succès les images satellitaires aux modèles de prédiction des récoltes.

### **2.4.3 Outils**

L'exploitation des images de télédétection nécessite indéniablement l'utilisation de matériel informatique approprié. Ce matériel, consistant principalement en logiciels spécialisés, s'est développé au rythme endiablé des hautes technologies durant les années 90. Les programmes ont constamment évolué en s'adaptant aux lancements des nouveaux satellites d'observation et en offrant de plus en plus de possibilités de traitements différents. Néanmoins, malgré une gamme plutôt étendue, les logiciels de télédétection sont relativement similaires et offrent généralement des fonctionnalités semblables. Ainsi, la plupart de ces logiciels proposent des options pour effectuer les opérations reliées aux prétraitements, pour extraire l'information et enfin pour diffuser celle-ci. Toutefois, certains sont davantage spécialisés et reconnus dans des créneaux spécifiques.

L'accès à ces logiciels spécialisés dans le traitement d'images satellitaires s'avère primordial pour la réalisation de notre projet. Heureusement, cette exigence a été remplie avec l'aide de certains partenaires. D'une part, le laboratoire de télédétection de l'INRS-ETE a gracieusement permis à notre équipe l'utilisation de deux logiciels de traitements d'images spatiales : PCI Geomatica<sup>1</sup> et eCognition<sup>2</sup>. D'autre part, le logiciel ENVI 4.0 de la compagnie Research Systems<sup>3</sup> a aussi servi dans le processus de traitement des images.

## 2.4.4 Méthodes de classification et défis d'application dans un contexte agricole

### 2.4.4.1 Théorie entourant les méthodes de classification

La télédétection regroupe de nombreuses méthodes d'analyse des données satellitaires. Les techniques de traitements d'images sont variées et adaptées pour différentes applications. Les méthodes de classification font partie intégrante de ces techniques.

Comme l'explique Bonn et Rochon (1992), la classification s'inscrit comme un « ...processus d'analyse visant la création d'images thématiques, c'est-à-dire dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels,... ». Il s'agit donc pour l'ordinateur d'associer et de regrouper des valeurs de l'image, selon des règles de décision mathématiques, dans des classes représentant des éléments de la réalité. La classification peut ainsi être qualifiée de processus de généralisation permettant de mieux décrire l'information présente dans l'image. Les méthodes de classification varient en fonction de l'échelle d'approche choisie (1<sup>er</sup> degré), de la connaissance a priori de l'analyste sur la nature des objets contenus dans l'image (2<sup>e</sup> degré), du type de conditions de classification utilisées (3<sup>e</sup> degré) et des règles de décisions mêmes (4<sup>e</sup> degré). Cette caractérisation en palier n'est pas universelle; certains auteurs

---

<sup>1</sup> <http://www.pcigeomatics.com/>

<sup>2</sup> <http://www.definiens-imaging.com/>

<sup>3</sup> <http://www.rsinc.com/>

définissent d'une autre manière les niveaux discriminants, mais elle est inspirée des écrits de Bonn et Rochon (1992) et de Caloz et Collet (2001).

Le premier degré se définit par l'échelle d'approche. Trois échelles sont généralement reconnues dans les méthodes de classification : l'approche par pixel, l'approche zonale et l'approche par objet. Dans le premier cas, le pixel est pris comme élément de référence. Dans le second cas, une portion de l'image est choisie et les propriétés de référence sont calculées sur un ensemble de pixels adjacents. Une dimension spatiale est ainsi introduite. Pour ce qui est de l'approche par objet, la classification est accomplie par une statistique spatiale d'objets déterminés et identifiés par l'analyse morphologique de l'image (Caloz et Collet, 2001).

Au deuxième degré, deux grandes familles de méthodes se distinguent. Les classifications dirigées et les classifications non dirigées. Dans le premier cas, une connaissance a priori du territoire couvert par l'image permet à l'utilisateur d'orienter l'apprentissage du programme de classification en lui communiquant des informations sur les objets présents dans l'image. La classification non dirigée, quant à elle, oblige le programme à analyser les données et à identifier les liens qui unissent les objets qui ont des propriétés spectrales semblables, en l'absence de connaissance préalable du territoire. Aucune donnée n'est alors transmise au programme et il doit discriminer les éléments en s'appuyant uniquement sur l'information contenue dans l'image.

Au troisième degré, une différenciation des méthodes de classification s'effectue selon le type de condition discriminante utilisée : les fonctions paramétriques et les fonctions non paramétriques. La distinction s'appuie sur la connaissance a priori ou non des paramètres statistiques associés aux classes en présence. Ainsi, les fonctions non paramétriques prennent seulement en compte la distance spectrale contrairement aux fonctions paramétriques qui associent à la signature spectrale une distribution statistique connue (Caloz et Collet, 2001).

Au quatrième et plus large degré, la séparation des méthodes de classification est basée sur les fondements mathématiques mêmes de la règle discriminante. Il existe donc une multitude de règles de décisions et d'algorithmes développés à l'aide de

principes mathématiques aussi divers les uns que les autres. Le tableau 2.2 en donne quelques exemples :

Tableau 2.2 : Quelques algorithmes de classification pour l'approche pixel (1<sup>er</sup> degré) et leurs caractéristiques correspondantes (d'après Bonn et Rochon, 1992)

2 <sup>e</sup> degré	3 <sup>e</sup> degré	4 <sup>e</sup> degré Méthode de classification
Dirigée	Paramétrique	Bayes
		Maximum de vraisemblance
	Non paramétrique	Plus proche voisin-K
Non dirigée	Paramétrique	Groupement basé sur la densité
	Non paramétrique	Groupement basé sur la distance

Les deux méthodes de classification retenues dans le cadre de ce projet sont la classification par maximum de vraisemblance et la méthode de classification floue par objet. Les sections 2.4.4.2 et 2.4.4.3 présentent ces deux méthodes et expliquent leur sélection.

#### 2.4.4.2 Classification par maximum de vraisemblance

L'algorithme du maximum de vraisemblance est une méthode de classification dirigée appartenant aux classificateurs paramétriques. Elle s'applique à l'échelle du pixel. Plusieurs études ont démontré l'efficacité de cette méthode par rapport aux autres classificateurs (Su, 2000). Caloz et Collet (2001 : 303) abordent d'ailleurs la méthode du maximum de vraisemblance comme :

« ... la méthode de classification la plus aboutie, car elle s'appuie sur des considérations théoriques approfondies. Développée pour un grand nombre de situations étrangères au traitement d'images, elle cherche à estimer la probabilité d'occurrence d'un événement en faisant intervenir toutes les connaissances que nous possédons *a priori* à son sujet. C'est l'approche bayésienne des probabilités. »

Les surfaces de décisions du classificateur du maximum de vraisemblance sont des hyperellipsoïdes dans l'espace spectral. La figure 2.1 ci-dessous illustre ces surfaces dans un espace bidimensionnel. Elles sont alors représentées par des ellipses dont les axes coïncident avec les variances maximales calculées dans chacune des bandes spectrales en fonction des connaissances préalables des objets identifiés dans l'image

par l'analyste. Pour plus d'information sur la théorie mathématique entourant le maximum de vraisemblance, on se reportera au Volume 3 de la série Précis de Télédétection (Caloz et Collet, 2001 : 302-307).

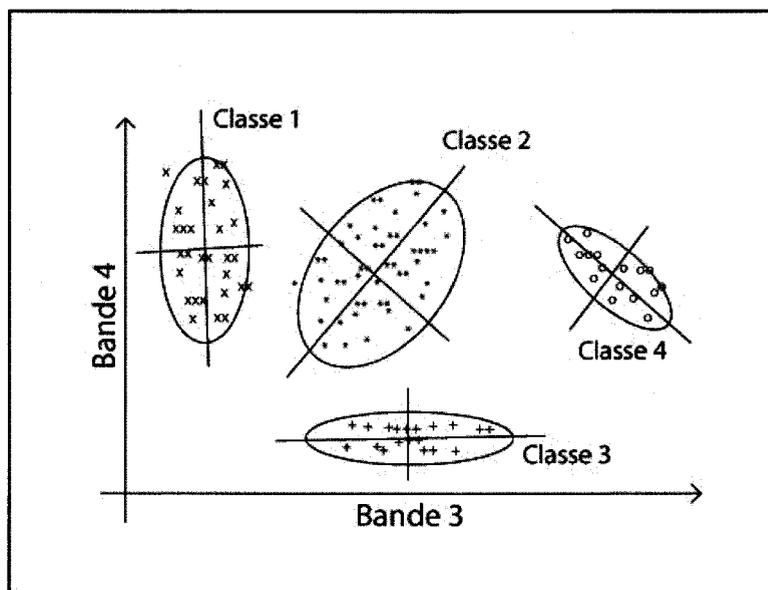


Figure 2.1 : Limites de classes selon la méthode par maximum de vraisemblance (inspiré de Caloz et Collet, 2001)

En plus d'être le classificateur paramétrique offrant dans de nombreux cas les meilleures performances, le maximum de vraisemblance est une méthode repère considérablement employée. En effet, étant très répandue dans la recherche et la littérature, elle est fréquemment utilisée comme barème lors d'évaluations d'autres méthodes de classification (Lu et al., 2003; Gomes et Marçal, 2003; Abou El-Magd et Tanton, 2003; Caloz et Pointet, 2003). Dans ce type d'étude, la précision obtenue lors de l'application d'un classificateur quelconque est alors mise en perspective avec la précision acquise par le classificateur du maximum de vraisemblance.

Le processus de classification par maximum de vraisemblance s'inscrit dans un cheminement classique de classification dirigée. En premier lieu, les définitions des classes thématiques sont établies. Par la suite, des zones d'entraînement sont déterminées à l'aide des connaissances a priori du territoire. Cette connaissance est appelée vérité terrain. Les zones d'entraînement sont ensuite caractérisées par une signature spectrale propre. Finalement, l'image est classifiée selon la règle de

décision choisie, le classificateur du maximum de vraisemblance et les zones d'entraînement établies. Cette approche est approfondie dans la section 4.1.3.3.

En résumé, l'intérêt de cette méthode de classification dans le cadre de ce projet réside principalement dans sa robustesse reconnue et sa présence importante dans la littérature comme balise pour l'analyse comparative d'autres classificateurs. Dans le cas présent, cet autre classificateur est la méthode de classification floue par objet qui est présentée dans la section qui suit.

#### 2.4.4.3 Classification floue par objet

La méthode de classification floue par objet développée par l'équipe de Definiens Imaging<sup>1</sup> pour le logiciel eCognition est unique en son genre dans le monde des logiciels de traitements d'images commerciaux appliqués à la télédétection. Comme son appellation l'indique, cette méthode s'appuie sur une approche par objet et non sur le pixel individuel. Ainsi, ce type de classification permet d'exploiter le contexte spatial du pixel et non pas uniquement le contexte spectral. Une des motivations soutenant cette approche est le fait que le résultat recherché dans la plupart des analyses d'images est l'extraction d'objets existants dans un monde réel, avec une forme représentative de cette réalité et une catégorisation thématique juste (Definiens Imaging GmbH, 2002). Cet objectif n'est pas toujours atteint totalement en utilisant les méthodes dont le pixel est l'élément de référence.

Plusieurs études ont démontré les avantages de cette méthode par rapport à d'autres classificateurs (Caloz et Pointet, 2003; Flanders et al., 2003; Schiewe et al., 2001). La flexibilité, l'efficacité et la facilité d'utilisation de la méthode de classification floue par objet rendent très attrayant l'emploi de celle-ci.

La classification floue par objet d'eCognition est réalisée par un enchaînement de deux processus bien distincts : la segmentation de l'image en objets et la classification floue. Cette particularité du logiciel rend la méthode difficile à catégoriser par rapport aux méthodes plus traditionnelles de classification. Une explication détaillée

---

<sup>1</sup> <http://www.definiens-imaging.com/>

de ces deux processus s'avère nécessaire pour bien saisir la démarche scientifique et technique de la classification floue par objet.

Tout d'abord, le processus de segmentation consiste à subdiviser l'image en différentes régions. L'attente envers la segmentation est d'extraire de façon automatique les objets qui présentent un intérêt à l'intérieur d'une image dans la poursuite d'un objectif particulier d'application. Pour combler cette attente, la segmentation doit relever le défi qui est créé par l'infinité de solutions qui existe pour la division de l'image. La segmentation doit donc être réalisée en réduisant le haut degré de liberté à une ou quelques solutions qui correspondent à ce qui est recherché tout en appliquant des règles non spécifiques à un seul problème. Pour accomplir cette segmentation, aussi retrouvée dans la littérature sous la dénomination de zonage par croissance de région, il existe diverses stratégies d'agrégation et de création de régions (Caloz et Collet, 2001). Parmi celles-ci, il faut mentionner : 1) les approches ascendantes, soit la fenêtre glissante et adjacente, les semis de points tirés au hasard et la méthode dite de bassin versant et 2) l'approche descendante qui s'appuie sur le principe de diagramme de Voronoï. Le logiciel eCognition fait appel à une segmentation ascendante de type semis de points tirés au hasard (Definiens Imaging GmbH, 2002). Cette approche permet la création d'objets en partant d'un pixel unique et en le fusionnant avec d'autres pixels voisins qui respectent les critères fixés pour obtenir des objets de plus grande dimension. Un semis de pixels est tiré au hasard et la segmentation se poursuit jusqu'à ce que tous les pixels de l'image soient affectés à une région ce qui peut impliquer plusieurs sélections de semis de pixels.

Précédant la segmentation, l'analyste doit définir les bandes à utiliser, les données vectorielles à incorporer si nécessaire et cinq paramètres majeurs servant de critères à la segmentation. Ces cinq paramètres sont l'échelle, la couleur, la forme, la compacité et le lissage. La figure 2.2 illustre la hiérarchie des paramètres et les relations entre eux.

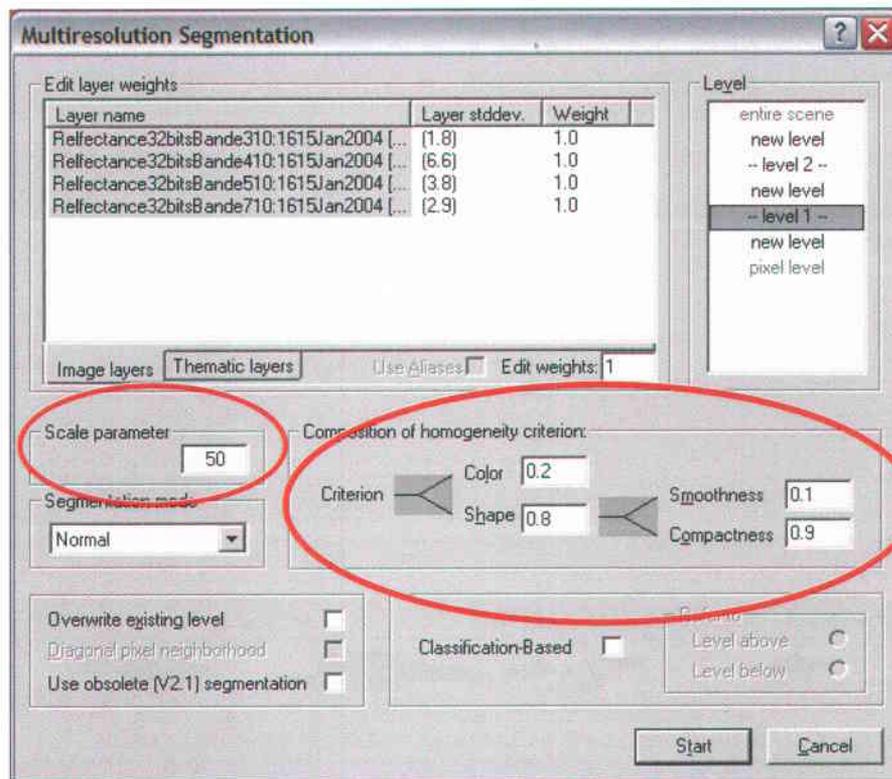


Figure 2.2 : Paramètres de segmentation du logiciel eCognition

Le critère d'échelle consiste en une mesure du maximum de changement d'hétérogénéité qui peut survenir lors de la fusion de deux objets. Les paramètres couleur et forme sont complémentaires et sont fixés en terme de pondération dont la somme est 1. En mettant l'accent sur l'un ou l'autre des paramètres, la différence au niveau spectral entre deux objets sera augmentée ou diminuée au profit de l'aspect de la forme des objets. De plus, le critère de forme est défini selon les sous-critères de compacité et de lissage qui sont eux aussi complémentaires. L'ajustement de ces paramètres influence la segmentation en favorisant ou non la création d'objets en fonction de l'état des frontières spectrales entre les objets. L'aspect mathématique des calculs des paramètres fixés par l'utilisateur et qui détermine la fusion des pixels entre eux est exposé en détail dans la section « Concepts & Methods » du guide de l'utilisateur du logiciel eCognition (Definiens Imaging GmbH, 2002).

Une fois la segmentation complétée, le processus de classification floue peut être entrepris. La classification floue est une méthode intéressante et flexible qui s'inscrit dans la famille des classifications dites souples (« soft ») qui deviennent de plus en

plus populaire en télédétection (Brandt et Mather, 2001 ; Caloz et Pointet, 2003). La logique floue (« Fuzzy logic ») est une approche mathématique pour quantifier des phénomènes difficilement distinguables ou des éléments de nature ambiguë. Pour ce faire, il s'agit de remplacer, par exemple, les expressions strictes de logique binaire « oui » et « non » (ça pourrait être vrai ou faux ou encore 0 ou 1 comme pour le langage binaire) par un intervalle continu entre 0 et 1 et où 0 se traduit par « absolument non » et 1 par « absolument oui ». Toutes les valeurs se situant entre ces deux bornes représentent un état plus ou moins certain de « oui » ou de « non ». Cette logique appliquée au processus de classification d'images est particulièrement appropriée au caractère vague et ambiguë que peuvent posséder les éléments contenus dans les données satellitaires (Definiens Imaging GmbH, 2002). Ainsi, la logique floue permet la notion d'appartenance partielle d'une telle manière qu'un objet peut avoir un degré d'appartenance non nul à plusieurs classes thématiques. Le niveau d'appartenance le plus élevé déterminera à quelle classe en particulier, l'objet est associé. Cette méthode amène indéniablement une plus grande flexibilité au processus de classification (Brandt et Mather, 2001).

La classification floue développée par eCognition est composée de trois étapes principales : le transfert direct (« Fuzzification »), le mécanisme d'inférence et le transfert inverse (« Defuzzification »).

Le transfert direct décrit la transformation d'un système réel ou non flou vers un système flou. Une pondération est attribuée par l'utilisateur à un objet en fonction d'une ou des fonctions d'appartenance. Ces fonctions peuvent prendre des formes variées et peuvent être appliquées à différentes caractéristiques de l'objet comme par exemple la valeur spectrale moyenne des bandes ou la dimension du périmètre. Le guide d'utilisateur du logiciel eCognition aborde plus en détails les concepts concernant les fonctions d'appartenance (Definiens Imaging GmbH, 2002 : 4-69, 4-70).

Le mécanisme d'inférence consiste à associer une classe thématique à un objet, en fonction du niveau d'appartenance calculé à partir de un ou plusieurs sous-ensembles flous créés lors du transfert direct. Lorsque plus d'un sous-ensemble flou est intégré dans la détermination de l'association de l'objet avec une classe, il est alors question

de déduction floue. Ces sous-ensembles sont traités à l'aide d'opérateurs définis hiérarchiquement qui permettent une décision univoque quant à la pondération d'une classe thématique assignée à un objet (Definiens Imaging GmbH, 2002; 4-72, 4-73).

Le transfert inverse, comme son nom l'indique, amène la transformation du système flou vers un système non flou. Suite au mécanisme d'inférence, la pondération maximum associée à une classe est attribuée à l'objet qui contient une valeur non floue qui est le numéro ou le nom de la classe. Ainsi, le processus de classification floue est finalement bouclé et le résultat se présente sous la forme d'une carte thématique.

#### 2.4.4.4 Défis des classifications dans un contexte agricole

La classification d'images est inévitablement soumise à des problèmes inhérents à l'environnement caractérisant la scène. De ce fait, certains types d'occupation du sol sont plus facilement identifiables par rapport à d'autres ce qui peut être dû aux propriétés spectrales ou spatiales de l'occupation ou encore à l'hétérogénéité du milieu qui favorise une certaine distinction. Lors de la classification d'une image couvrant un territoire à vocation agricole, certains défis et difficultés doivent être pris en compte pour mettre en perspective les résultats statistiques qui découlent d'un tel traitement. Ces conditions particulières méritent d'être expliquées pour bien comprendre la complexité et les subtilités qui influencent les résultats présentés plus loin dans ce mémoire. Les conditions rencontrées ont été divisées selon deux ordres, soit les facteurs généraux, qui sont applicables pour la majorité des classifications de territoires agricoles, et les facteurs locaux, qui sont spécifiques au projet et qui s'ajoutent aux difficultés plus globales.

Les facteurs d'ordre général sont principalement reliés à la nature même de l'élément à identifier soit le type de végétation. Caloz et Collet (2001 ; 275, 276) exposent de façon concise les difficultés associées à la reconnaissance de la végétation :

« Il existe une forte composante aléatoire caractérisant les phénomènes naturels, plus particulièrement dans le cadre de notre thème d'étude, des propriétés décrivant la manifestation spectrale des classes d'occupation du sol. En effets, celles-ci se caractérisent, dans chaque bande spectrale par un intervalle de luminance centré sur une moyenne. Ces deux indicateurs de dispersion et de centralité constituent la signature spectrale de la

classe. Or, la signature spectrale d'une catégorie n'est pas invariante dans l'espace géographique. Nature des sols, effets climatiques locaux modifient l'activité végétale de sorte qu'une même variété culturale est sujette à manifester des signatures spectrales différentes d'une région à l'autre. »

Autrement dit, deux champs de même culture mais situés à des endroits différents dans l'image peuvent présenter des réflectances différentes, indépendamment des facteurs reliés au capteur. Les similitudes et le chevauchement des signatures spectrales de diverses cultures rendent d'autant plus complexe leur identification. Ainsi, le blé, l'avoine et l'orge observés par satellites, dévoilent des comportements spectraux similaires malgré la différence de nature de la plante. Les opérations aux champs constituent eux aussi un obstacle potentiel au bon déroulement des classifications. Que ce soit le labour, la fauche ou d'autres opérations, ils impliquent souvent une modification du couvert végétal qui complique l'identification des cultures. D'autre part, la croissance des végétaux rend difficile l'établissement d'une signature spectrale reconnaissable à tout moment de la saison végétative. En effet, le stade phénologique de la plante influe grandement sur les propriétés spectrales qui sont associées à une culture en particulier. Par exemple, au début de juin, les plants de maïs sont à peine sortis de terre. À ce moment, la signature spectrale du champ de maïs sur une image satellite de moyenne résolution spatiale (15 - 30 m) se rapproche beaucoup plus de la signature du sol où la culture pousse. Tandis qu'au début d'août, sur le même champ, le sol est complètement recouvert par la végétation et n'a aucune influence sur la signature spectrale associée au maïs.

Les facteurs spécifiques au projet découlent essentiellement des travaux précédents à l'INRS-ETE. Effectivement, les données d'occupation du sol recueillies pour l'année 1999 et 2000 comportent une part d'incertitude qui est malheureusement transférée aux processus de classification. Ces données sont importantes car elles sont utilisées comme vérité terrain et tant la classification par maximum de vraisemblance que la classification floue par objet s'appuient sur cette information. L'hypothèse posée est que ces données évoquent de façon parfaite les cultures présentes sur le territoire pour ces deux étés. Cependant, le peu de documentation concernant la phase d'acquisition des données d'occupation du sol et leur spatialisation rend plus difficile leur appréciation en terme de qualité. Ce sujet sera abordé plus longuement dans une section ultérieure. Un autre facteur spécifique dans le cas présent, mais qui est

intiment relié à un facteur global mentionné précédemment, est le fait de ne posséder qu'une seule image pour chaque année de vérité terrain. En ayant plus d'une image pour un même été, il est possible de réduire les effets de variations spatiales dans les cultures et les effets reliés aux stades phénologiques des végétaux ce qui est pratiquement impossible avec une image uni-date.

## 2.5 Synthèse

Tel que présenté dans ce chapitre, la télédétection pourrait constituer une méthode efficace pour identifier l'occupation du sol d'un territoire à vocation agricole dans le but d'intégrer ces données dans le modèle de simulation agroenvironnemental AnnAGNPS. De plus, La méthode de classification floue semble une alternative intéressante à explorer par rapport à la méthode du maximum de vraisemblance.



## **3 DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE ET DES CAPTEURS SATELLITAIRES UTILISÉS**

---

Cette section du mémoire a pour but de décrire le territoire à l'étude et d'exposer les capteurs satellitaires utilisés pour le projet. Un portrait du sous-bassin versant de la rivière Boyer Nord est dressé de même que celui du bassin versant principal, soit le bassin de la rivière Boyer. Les deux bassins sont présentés selon la même approche : le profil physique du bassin est tout d'abord exposé puis le profil environnemental est abordé. Par la suite, une présentation du capteur ASTER du satellite Terra et du capteur ETM+ du satellite Landsat-7 s'impose.

### **3.1 Description du territoire**

#### **3.1.1 Description du bassin versant de la rivière Boyer**

##### **3.1.1.1 Profil physique**

Situé dans la province de Québec, au Canada, le bassin versant de la rivière Boyer occupe une superficie de 217 km<sup>2</sup> dans la région administrative de Chaudière-Appalaches sur la rive sud du Fleuve Saint-Laurent. La rivière Boyer se déverse dans le Fleuve à la hauteur de la municipalité de Saint-Vallier soit à environ 30 km à l'est de la Ville de Québec (figure 3.1). Le bassin versant de la rivière chevauche deux Municipalités Régionales de Comté (MRC) : la MRC de Bellechase à 80 % et la MRC de Desjardins à 20 %. Onze municipalités se retrouvent en partie ou en entier à l'intérieur des limites du bassin.

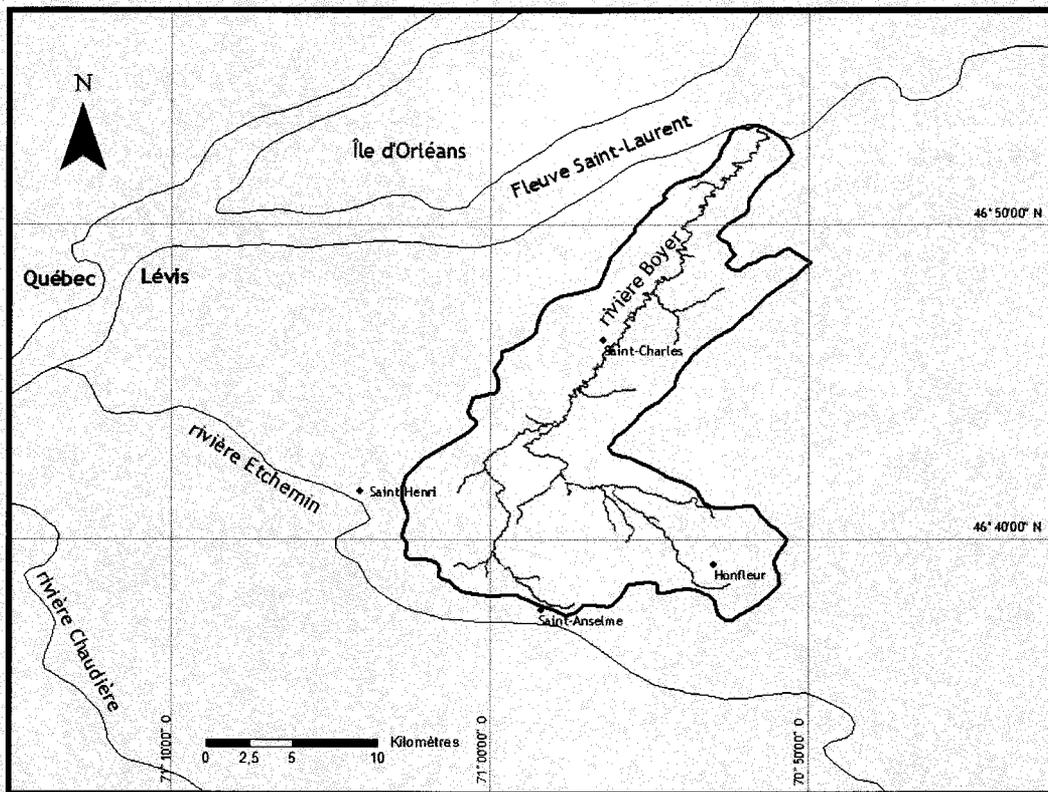


Figure 3.1 : Situation géographique du bassin versant de la rivière Boyer

La rivière coule du sud vers le nord. La partie amont de la rivière est campée sur le plateau des Appalaches, culminant à une altitude de 275 mètres au-dessus du niveau moyen des mers (NMM). Le bassin versant diminue progressivement en altitude pour atteindre un niveau de moins de 10 mètres à l'exutoire de la rivière, qui sillonne les Basses-Terres du St-Laurent à cet endroit. L'emplacement géographique exact du bassin se situe entre les longitudes ouest de  $70^{\circ}49'30''$  et  $71^{\circ}03'30''$  et entre les latitudes nord de  $46^{\circ}37'00''$  et  $46^{\circ}53'30''$ .

En ce qui a trait aux caractéristiques hydrographiques, le bassin versant de la rivière Boyer est drainé par près de 345 km de cours d'eau dont 32 km pour le tronçon principal. La rivière compte trois principaux affluents : la rivière Boyer Nord, la Boyer Sud et le ruisseau du Portage. Quatre sous-bassins principaux sont ainsi distingués, en l'occurrence celui de la Boyer (partie aval de la rivière) ( $74 \text{ km}^2$ ), de la Boyer Nord ( $55 \text{ km}^2$ ), de la Boyer Sud ( $67 \text{ km}^2$ ) et de la rivière Du Portage ( $21 \text{ km}^2$ ) (figure 3.2). La

penne générale des cours d'eau du bassin varie entre 2,5 m/km pour la branche principale de la rivière et 10,5 m/km pour la branche Sud. Le lac St-Charles occupe une superficie de moins de 1 km<sup>2</sup> dans le sous-bassin de la Boyer. Le débit moyen mesuré à l'embouchure de la rivière Boyer est de 5 m<sup>3</sup>/s, avec un débit atteignant des pointes de 20 m<sup>3</sup>/s durant la crue printanière du mois d'avril.

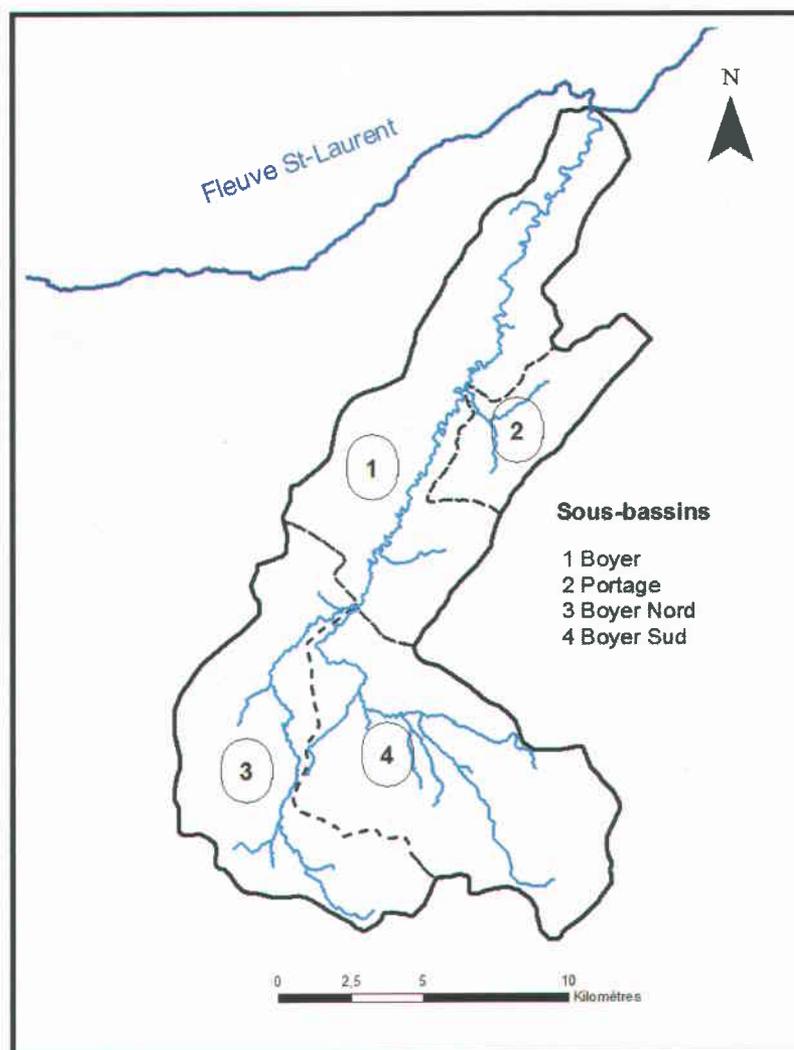


Figure 3.2 : Sous-bassins versants de la rivière Boyer

Le climat observé dans le bassin versant de la rivière Boyer est du type tempéré froid, à caractère continental très prononcé (Landry, 1998). La température annuelle moyenne est de 3,6°C et la période sans gel s'étend sur environ 120 jours par année. La précipitation moyenne annuelle est de 1135 mm incluant 280 mm de neige (en

équivalent en eau), soit une proportion de 25 % des précipitations totales. Mabit et al. (2004) soulignent que la texture des sols retrouvés sur le bassin versant « ... est variable, passant d'argileuse en bordure de la rivière et de ses affluents (souvenir de l'invasion marine Champlain ou de dépôts d'alluvions récentes), à plus grossière et schisteuse en s'éloignant de part et d'autre des cours d'eau. ».

### 3.1.1.2 Profil environnemental

L'utilisation du sol est dominée par l'agriculture sur près de 60 % de la superficie du bassin comparativement aux forêts qui en occupe 40 %. Les zones urbaines sont donc négligeables en terme de superficie, représentant moins d'un pourcent. La population totale du bassin avoisine les 16 000 habitants. Près de 300 entreprises agricoles en opération se retrouvent sur le territoire du bassin de la Boyer. Dans la partie aval de celui-ci, la production laitière occupe une place prépondérante. Le paysage agricole de ce secteur est caractérisé par des herbages. La partie amont du bassin abrite quant à elle, une agriculture davantage intensive. Les cultures annuelles (orge et maïs) sont présentes en forte proportion et la production porcine est importante. À l'échelle du bassin, 55 % des unités animales (u.a.) recensés (23 055 u.a. au total) sont des porcs et 38 % des bovins. Toujours à cette même échelle, la distribution des cultures expose une dominance des fourrages qui constituent 72 % de la superficie cultivée, les céréales à pailles 20 %, le maïs 7 % et les fruits et légumes 1 %. Spatialement, les cultures réputées comme étant plus érosives (plantes annuelles) se concentrent dans les sous-bassins Boyer Nord, Boyer Sud et surtout Boyer où la forêt ne couvre que 33,7 % du territoire (Mabit et al., 2004).

La production porcine sur le bassin versant de la Boyer génère des excédents de lisiers considérables (Mabit et al., 2004). L'application de lisiers porcins en excès provoque un enrichissement des sols en phosphore ce qui se traduit éventuellement par une dégradation de la qualité de l'eau des cours d'eau dans le bassin versant de la Boyer. Des concentrations médianes de phosphore de 0,152 mg P-total/L ont été observées dans la rivière Boyer lors d'une étude réalisée de 1989 à 1995 (Patoine et Simoneau, 2002). Cette valeur est considérable lorsqu'elle est comparée au critère de qualité retenu par le ministère de l'Environnement du Québec (MENV) pour prévenir l'eutrophisation des rivières qui est de 0,03 mg P-total/L. De plus, Mabit et al. (2004)

ont démontré, à l'aide de la modélisation de la distribution spatiale du radio-isotope anthropique  $^{137}\text{Cs}$ , que 90 % des sédiments retrouvés dans le lit du cours d'eau proviendraient des champs agricoles, les 10 % restant étant issus des berges. Il est donc évident que la qualité de l'eau de la rivière Boyer est sérieusement affectée par l'agriculture intensive qui prend place dans son bassin.

### **3.1.2 Description du bassin versant de la Boyer Nord**

#### **3.1.2.1 Profil physique**

Comme mentionné précédemment, le bassin versant de la Boyer Nord est un sous-bassin de la rivière Boyer d'une superficie de 55 km<sup>2</sup>. Cependant, les limites du bassin de la Boyer Nord qui servent à la simulation AnnAGNPS ont été établies dans des travaux précédents en fonction des stations de mesures hydrographiques du MENV. Ces limites définissent un sous-bassin de la Boyer Nord différent de celui illustré à la figure 3.2. La figure 3.3 illustre ce bassin simulé qui est plus petit que le bassin de la Boyer Nord.

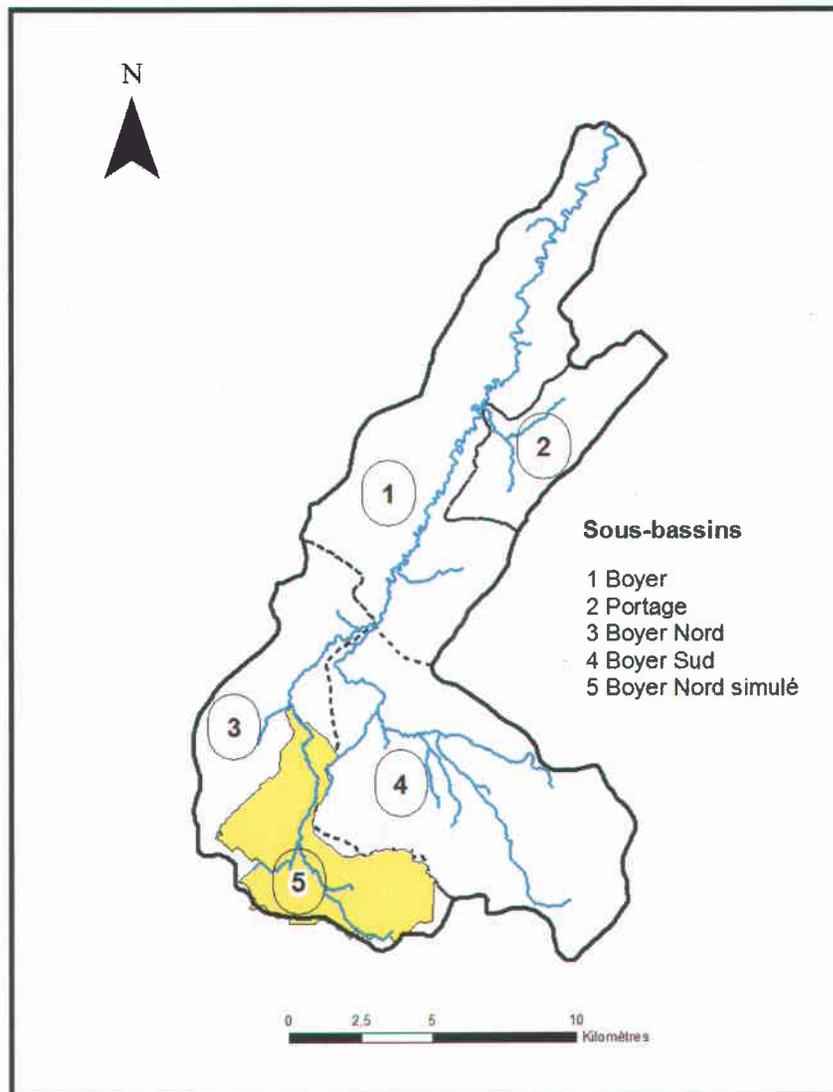


Figure 3.3 : Bassin versant simulé de la rivière Boyer Nord

Le bassin versant simulé de la Boyer Nord draine une superficie de 29,8 km<sup>2</sup>. Le bassin se situe dans les MRC de Bellechase et Desjardins, entre 70°56'5'' et 71°02'12'' de longitude ouest et 46°37'42'' et 46°42'22'' de latitude nord. Il chevauche les municipalités de Saint-Anselme et de Saint-Henri. La topographie du bassin de la Boyer Nord est relativement plane puisque 70 % de la superficie du territoire possède une pente inférieure à 2 %. Le plus haut sommet retrouvé sur le bassin se situe à une altitude de 210 m tandis que la rivière quitte la région de simulation à une hauteur de 79 m au-dessus du Niveau Moyen des Mers (NMM). La pente moyenne de la rivière Boyer Nord est de 5,1 m/km et le sens de l'écoulement demeure du sud vers le nord. Le débit moyen de la rivière est de 0,74 m<sup>3</sup>/s selon les mesures de la station à

l'embouchure du bassin pour les années 1998 et 1999. La valeur minimale observée du débit journalier a été de  $0,020 \text{ m}^3/\text{s}$  et la valeur maximale atteinte durant cette période a été de  $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les sols sont principalement composés de loams (25 % de la superficie du bassin) et de loams sableux (59 %) (Gangbazo et al., 2002).

### 3.1.2.2 Profil environnemental

Le bassin versant simulé de la rivière Boyer Nord affiche un paysage un peu différent du bassin de la Boyer. En effet, l'utilisation du sol est consacrée à l'agriculture en proportion de 46 % tandis que 53 % de la superficie du bassin est couvert par des zones de forêts. Néanmoins, les zones urbaines ne représentent toujours pas plus de 1 % de la superficie du territoire. Plus de 32 % de la superficie cultivée est occupé par des fourrages, près de 8 % par du maïs et un peu moins de 6 % par des céréales. Les élevages qui se trouvent dans le secteur sont intensifs et sont essentiellement composés de porc (56,8 % des u.a.) et de bovins laitiers (22,4 %) (Gangbazo et al., 2002).

De la même façon que dans l'ensemble du bassin de la Boyer, les sols du bassin de la Boyer Nord sont fertilisés à l'excès. Ainsi, la qualité de l'eau de la rivière Boyer Nord est affectée considérablement par les activités agricoles qui ont lieu dans le bassin et est qualifiée de mauvaise (Gangbazo et al., 2002). D'une part, des concentrations médianes estivales de phosphore total qui s'élevaient à  $0,21 \text{ mg/L}$  ont été observées. D'autre part, des teneurs très hautes en nitrate ont été mesurées de même que des quantités importantes de sédiments en suspension.

## 3.2 Description des capteurs satellitaires

### 3.2.1 ASTER

Le capteur ASTER fait partie de la flotte des vingt-quatre capteurs du programme EOS (Earth Observation System) créé et dirigé par la NASA. Le projet ASTER est issu d'une collaboration et d'un effort conjoint entre la NASA et le Ministère des Échanges Économiques et de l'Industrie (METI) du Japon. Lancé le 19 décembre 1999 à bord de la plate-forme Terra, le capteur ASTER a été développé dans le but de succéder au

satellite OPS/JERS-1. L'objectif principal du projet ASTER est de contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes locaux et régionaux à la surface de la Terre et dans son atmosphère<sup>1</sup>. Un des objectifs spécifiques poursuivi par le projet est de comprendre davantage la distribution et les changements au niveau de la végétation. L'espérance de vie de la mission du satellite Terra a été fixée à 6 ans.

### 3.2.1.1 Caractéristiques de l'orbite d'ASTER<sup>2</sup>

Le satellite Terra opère sur une orbite circulaire, pratiquement polaire, qui est héliosynchrone et qui traverse l'équateur au nœud descendant au temps local de 10h30. Le satellite se déplace à une altitude de 705 km. Son orbite lui permet un cycle de couverture du même site à la même heure aux seize jours. Il est donc impossible d'obtenir deux images d'un site pour la même heure dans un délai inférieur à seize jours. Les caractéristiques orbitales du satellite Terra sont identiques à celles du satellite LANDSAT-7 à l'exception de l'heure de croisement de l'équateur.

### 3.2.1.2 Caractéristiques spectrales et spatiales du capteur ASTER

Le capteur ASTER possède 14 bandes spectrales s'étendant du visible à l'infrarouge thermique avec des hautes résolutions spatiales, spectrales et radiométriques (Adams et al., 2002). Une bande additionnelle dans le proche infrarouge avec une visée arrière permet la prise de couple stéréoscopique. Le capteur est muni de trois différents sous-systèmes optiques conçus en fonction des longueurs d'onde: un système pour le visible et le proche infrarouge (VPIR), un système pour le moyen infrarouge (MIR) et un système pour l'infrarouge thermique (IRT). Chaque sous-système possède une résolution spatiale différente : 15 m pour le visible et le proche infrarouge, 30 m pour le moyen infrarouge et 90 m pour l'infrarouge thermique. Les scènes couvertes par le satellite ASTER sont de dimension 60 x 60 km (3600 km<sup>2</sup>). Le tableau 2.2 présente en détail les propriétés spectrales, spatiales et radiométriques pour chaque bande du capteur.

---

<sup>1</sup> [http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/about\\_aster/index.html](http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/about_aster/index.html)

<sup>2</sup> <http://terra.nasa.gov/>

Tableau 3.1 : Caractéristiques spatiales, spectrales et radiométriques du capteur ASTER (Yamaguchi et al., 2001)

Sous-système	No. Bande	Intervalle spectral ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale (m)	Résolution radiométrique (bits)
VPIR	1	0,52-0,60	15	8
	2	0,63-0,69		
	3N	0,78-0,86		
	3B	0,78-0,86		
MIR	4	1,60-1,70	30	8
	5	2,145-2,185		
	6	2,185-2,225		
	7	2,235-2,285		
	8	2,295-2,365		
	9	2,360-2,430		
IRT	10	8,125-8,475	90	12
	11	8,475-8,825		
	12	8,925-9,275		
	13	10,25-10,95		
	14	10,95-11,65		

Le capteur ASTER est un système dit passif, c'est-à-dire qu'il se contente d'enregistrer l'énergie naturelle (réfléchi ou émise) provenant de la Terre (Bonn et Rochon, 1992). Les sous-capteurs VPIR et MIR utilisent un système de balayage parallèle à la trajectoire, appelé balayeur à barrettes. Le sous-capteur IRT est quant à lui constitué d'un système de balayage perpendiculaire à la trajectoire. VPIR et MIR usent du déplacement du satellite pour amasser des données tandis que IRT fait appel à un système mécanique pour balayer la surface. Les capteurs ont aussi la capacité d'acquérir des images selon divers angles de visée perpendiculaires à la trajectoire du satellite. Pour VPIR, cette visée s'étend de +24 degrés à -24 degrés. De leur côté, MIR et IRT peuvent pointer de -8,55 degrés à +8,55 degrés. Chaque système optique possède aussi un format et une composition de détecteur distinct. Ainsi, le VPIR est équipé, pour chaque bande, de détecteur de 5000 cellules de silicium (Si) à transfert de charge CCD (Charged Coupled Devices) dont 4000 sont utilisées pour capter l'énergie. Le détecteur MIR possède 2048 cellules CCD de platine et silicium (PtSi)

pour chaque bande. Le détecteur IRT est uniquement composé de 10 cellules CCD de mercure, cadmium et technétium (HgCdTc) (Yamaguchi et al., 2001).

### **3.2.1.3 Les applications d'ASTER**

L'apparition du capteur ASTER dans le domaine de la télédétection est relativement récente. Les premières images livrées au public datant de 2000, ce n'est donc pas surprenant de voir encore peu de littérature sur les applications de ce capteur. Les articles traitant de l'utilisation d'ASTER pour l'identification de l'occupation du sol dans un milieu agricole sont par le fait même peu nombreux. Cependant, un travail de recherche mérite d'être exposé dans cette section.

Les chercheurs Gomes et Marçal (2003), ont travaillé sur l'évaluation des images ASTER pour mettre à jour l'occupation du sol de la région de Vale do Sousa au Portugal. Ils ont ainsi appliquée une méthode de classification supervisée de type objet sur une image ASTER. Ils ont ensuite évalué la précision de la méthode à l'aide de matrices de confusion et par des relevés terrain. Leur recherche démontre la pertinence d'utiliser des images ASTER dans un tel contexte.

### **3.2.2 LANDSAT-7 ETM+**

L'origine du programme Landsat, en premier lieu appelé Earth Resources Technology Satellite (ERTS), remonte au début des années 1970. C'est en 1972, que le satellite Landsat-1 est envoyé en orbite par la NASA. Depuis ce jour, cinq autres satellites de cette famille ont conquis l'espace, le dernier étant Landsat-7 lancé le 15 avril 1999. En 1978, l'exploitation du programme Landsat a été confiée à une entreprise privée (EOSAT) qui l'opère depuis ce temps. Le but premier de la plus récente mission est d'assurer une continuité dans l'acquisition de données de la surface de la Terre provenant des satellites Landsat. Landsat-7 et son capteur ETM+ permettent aux scientifiques de suivre et d'inventorier d'importants processus naturels et l'utilisation du territoire par l'homme comme par exemple la croissance végétative, l'agriculture,

l'érosion des berges des rivières, etc. Le satellite a été conçu pour une durée de vie de cinq ans avec une extension possible d'un an<sup>1</sup>.

### **3.2.2.1 Caractéristiques de l'orbite de Landsat-7**

Comme mentionné précédemment, l'orbite du satellite Landsat-7 possède les mêmes caractéristiques que celle du satellite Terra à une exception près : son heure de croisement de l'équateur au nœud descendant est à 10h, heure locale. Le satellite Landsat-7 devance donc d'une demi-heure en moyenne le satellite Terra. L'orbite de Landsat-7 est héliosynchrone et polaire. Son altitude à l'équateur est de 705 km et son inclinaison est de 98,2 degrés. Son cycle de répétitivité est de 16 jours.

### **3.2.2.2 Caractéristiques spectrales et spatiales du capteur ETM+**

Le capteur Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) est constitué de 7 bandes spectrales couleurs et d'une bande spectrale panchromatique. La résolution spatiale est de 30 m pour les bandes du visible, proche et moyen infrarouge, 60 m pour la bande thermique et 15 m pour la bande panchromatique. La dimension d'une scène est de 183 km dans la direction perpendiculaire à la trajectoire du satellite et 170 km dans la direction parallèle à cette trajectoire (31 110 km<sup>2</sup>). Le tableau 2.3 présente les différents paramètres spatiaux, spectraux et radiométriques pour chaque bande.

---

<sup>1</sup> <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

Tableau 3.2 : Caractéristiques spatiales, spectrales et radiométriques du capteur ETM+ de Landsat-7<sup>1</sup>

Capteur	No. Bande	Intervalle spectral ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale (m)	Résolution radiométrique (bits)
ETM+	1	0,45-0,52	30	8
	2	0,52-0,60		
	3	0,63-0,69		
	4	0,76-0,90		
	5	1,55-1,75		
	6	10,4-12,5	60	
	7	2,08-2,35	30	
	8	0,50-0,90	15	

Tout comme le capteur ASTER, le capteur ETM+ est un système passif. Cependant, ETM+ est constitué d'un système de balayage perpendiculaire à la trajectoire (whisk-broom) dont la visée pointe toujours au nadir et ne peut être déployée.

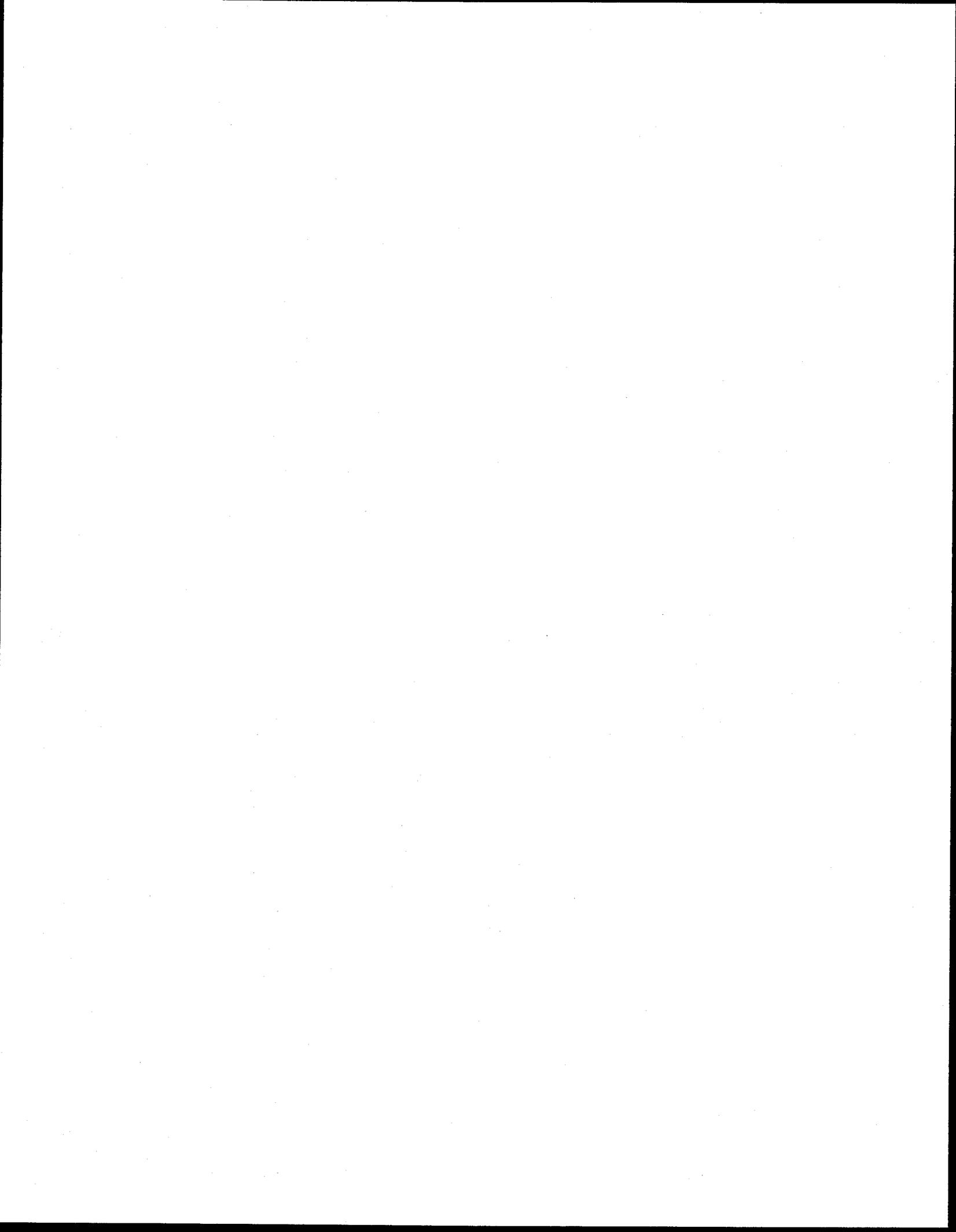
### 3.2.2.3 Les applications de Landsat-7 ETM+

Étant le dernier d'une longue lignée de satellite, Landsat-7 ETM+ possède des champs d'applications similaires à ceux dans lesquels ses prédécesseurs ont déjà fait leurs preuves. La poursuite de la mission Landsat crée un attrait particulier pour cette famille de satellites particulièrement au niveau des applications en agriculture. En effet, ils offrent la chance d'étudier les différents changements cultureux sur une période ininterrompue de plus 32 ans (Moran et al., 2003).

Ces caractéristiques étant similaires au capteur TM de Landsat-5, les domaines d'application sont déjà connus et définis pour le capteur ETM+ de Landsat-7, malgré le fait que celui-ci a été lancé tout récemment. Ainsi, de nombreuses études ont

<sup>1</sup> <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

démontré l'utilité des capteurs TM et ETM+ dans un contexte d'application agricole (Marzen et al., 2000; Rogan et al., 2002; Williams et al., 1987; Abou El-Magd et Tanton, 2003; Bhuyan et al., 2003; Su, 2000; Lu et al., 2003).



## 4 DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

---

Le projet est divisé selon deux axes de recherche bien distincts. Le premier comprend tous les aspects concernant la télédétection soit l'acquisition d'images, les prétraitements et les classifications. Le second axe comporte l'ensemble des étapes nécessaires à la transformation des résultats des classifications dans un format compatible au modèle AnnAGNPS. Ces étapes s'inscrivent dans une démarche géomatique d'intégration de données. Le présent chapitre explique en détail l'ensemble des manipulations réalisées dans le cadre de cette recherche.

Afin de faciliter la compréhension de la démarche scientifique exposée dans ce chapitre, des diagrammes de différentes échelles de détails schématisent les processus employés. Le diagramme de la page suivante expose le plan général de la démarche de recherche du projet.

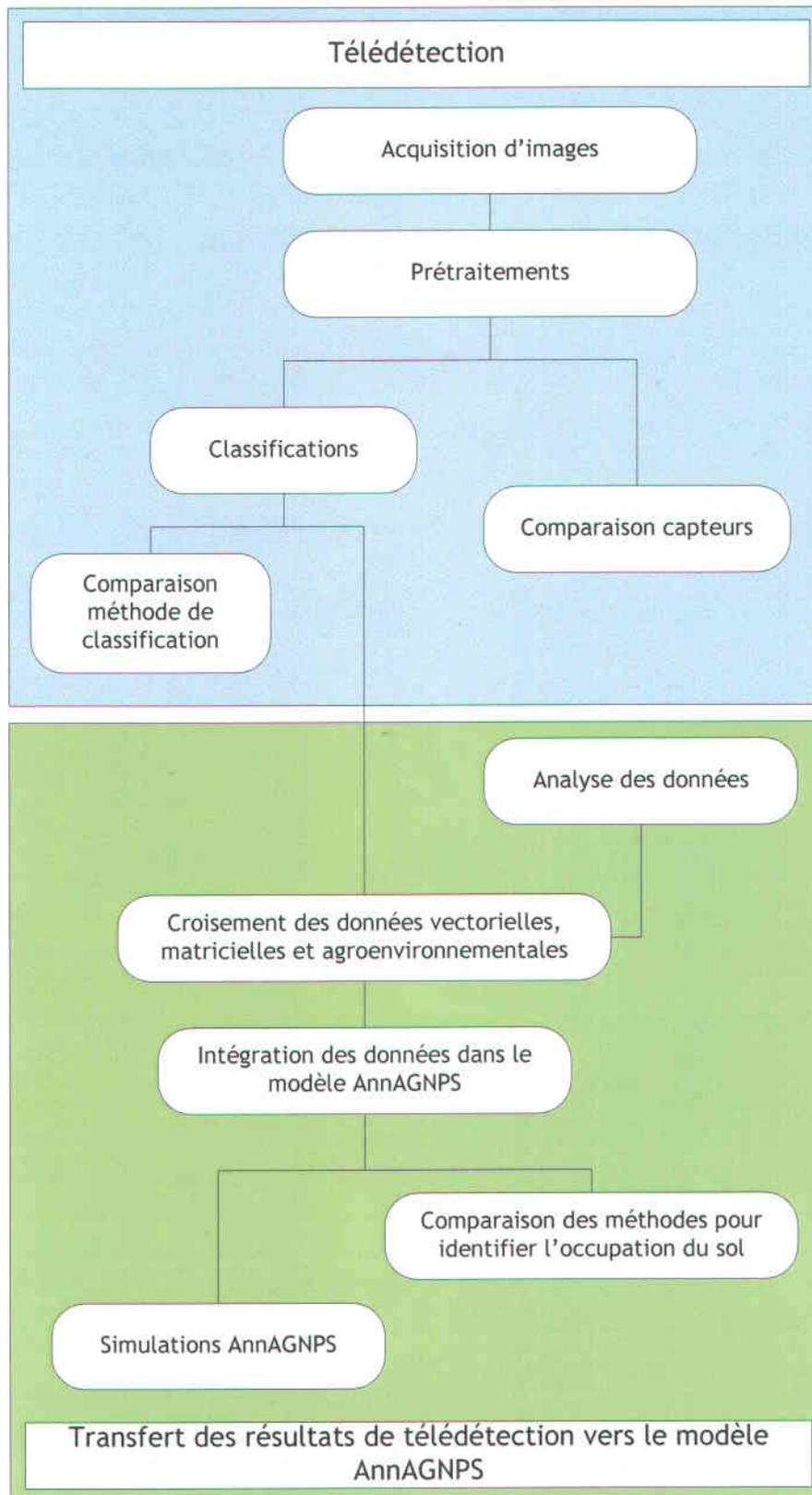


Figure 4.1 : Diagramme résumant visuellement la démarche scientifique du projet

## 4.1 Aspect de la télédétection

### 4.1.1 Acquisition des images

#### 4.1.1.1 Images ASTER et Landsat-7 ETM+

L'acquisition d'images de télédétection s'est appuyée sur trois principaux critères établis. Le premier critère, qui peut paraître une évidence, est que la scène doit couvrir l'ensemble du bassin versant de la Boyer Nord. Le deuxième critère est relié aux conditions climatiques lors de la prise de données. En effet, il doit y avoir un minimum de couverture nuageuse au-dessus du bassin et la scène ne doit pas être trop fortement affectée par les conditions atmosphériques (brume, humidité élevée, etc.). Comme troisième critère, l'image doit être acquise à une période où les cultures ont atteint un stade phénologique permettant leur discernement (Bernier et al., 1984). Les images de printemps ne sont donc pas adéquates car elles contiennent majoritairement des sols nus ou des pousses trop jeunes et trop courtes pour être distinguables par les capteurs. Quant aux images d'automne, elles présentent le risque de ne pas couvrir toute la diversité des exploitations, les dates de récoltes différant d'une culture à l'autre. Deux critères spécifiques et relatifs à l'atteinte des objectifs du projet ont aussi guidé le processus d'acquisition des images. Tout d'abord, la scène doit absolument concorder avec les époques où il existe des données terrain, c'est-à-dire pour les années 1999 et 2000. Le respect de ce critère est essentiel pour réaliser les classifications. Ensuite, dans le but de comparer les deux capteurs, il faut idéalement posséder une image ASTER et une image Landsat-7 ETM+ prises la même journée. Ces deux critères sont indépendants et complètent les trois conditions d'ordre général.

Une contrainte concernant les dates de lancement des satellites s'ajoute aux critères d'acquisition. Effectivement, le capteur ASTER a été lancé à la fin de l'année 1999. Il est ainsi impossible de se procurer une image ASTER couvrant la même période que la vérité terrain de 1999. Il faut donc se rabattre sur des images du satellite Landsat-7 ETM+, qui lui a été lancé au printemps de 1999. Suite à une recherche exhaustive sur le site web de distribution d'images EOS<sup>1</sup>, quatre images respectent les critères

---

<sup>1</sup> <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>

d'acquisition. Elles sont présentées dans le tableau 4.1 accompagnées, entre parenthèses, de leur niveau d'acquisition<sup>1</sup> et de la date à laquelle elles ont été prises.

Tableau 4.1 : Images acquises

ASTER (1A)	Landsat-7 ETM+ (1G)
	14 juillet 1999 (10h24 HAE)
23 juin 2000 (10h58 HAE)	
19 juillet 2001 (10h57 HAE)	19 juillet 2001 (10h21 HAE)

Les conditions climatiques et la périodicité des satellites complexifient l'acquisition de bonnes images. Ainsi, il est difficile de trouver des images dans la fenêtre d'acquisition mi-juin à fin août car, étant donné la fréquence assez longue de couverture des satellites (16 jours), seulement 5 images sont prises durant cette période. Parmi ces images, il faut espérer que la couverture nuageuse soit inexistante ou très faible au-dessus du bassin lors de la prise d'image, une condition qui n'est pas toujours remplie sous le climat qui caractérise les étés du Québec. En effet, un pourcentage d'heure d'ensoleillement avoisinant à peine les 50 % pour les mois de juin, de juillet et d'août est observé à la station météorologique de l'aéroport de Québec située à une quarantaine de kilomètres du bassin de la Boyer Nord<sup>2</sup>.

#### 4.1.1.2 Autres images

Deux autres types d'images ont été acquis dans le but de réaliser certains traitements. Ainsi, une série de quatre orthophotographies, à l'échelle 1 : 40 000, a été commandée auprès du ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRN). Ces images sont utilisées pour l'étape des transformations géométriques. De plus, une

<sup>1</sup> Le niveau d'acquisition de l'image est défini par les prétraitements qui sont effectués préalablement à l'envoi de l'image au client par l'équipe scientifique du capteur. Landsat : [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_htmls/chapter11/chapter11.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html) ; ASTER: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/products/data\\_products.htm](http://asterweb.jpl.nasa.gov/products/data_products.htm)

<sup>2</sup> <http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/>

série de 217 images aéroportées de 1 km<sup>2</sup> de superficie couvrant le bassin de la Boyer Nord a été acquise en mai 2002. Ces petites scènes sont géoréférencées et assemblées en mosaïque; elles sont ensuite employées pour la mise à jour des données vectorielles du bassin. L'annexe A contient davantage d'information concernant ces images.

### **4.1.2 Prétraitements**

Les opérations de prétraitements sont indispensables pour exploiter efficacement les données satellitaires. Elles permettent de fonctionner dans un espace de travail géoréférencé, de pouvoir utiliser des images dépourvues de défauts visuels et de quantifier en valeurs physiques le contenu des images. Deux catégories d'opération sont regroupées sous le terme de prétraitements : les transformations radiométriques et les transformations géométriques.

#### **4.1.2.1 Sélection des bandes à traiter**

Une sélection des bandes les plus avantageuses dans le cadre de l'étude s'avère importante pour éviter une surcharge inutile de transformations appliquées aux images. Le processus de sélection des bandes est abordé en détail dans ce qui suit.

Le choix des bandes spectrales ASTER à utiliser dans les classifications est appuyé par différentes sources et s'inscrit dans un cheminement méthodique. Dès le départ, les bandes du capteur thermique (bandes 10, 11, 12, 13, 14) sont mises de côté du fait que celles-ci présentent peu d'intérêt pour la détection des cultures et que leur résolution spatiale est grossière (90 m). Par la suite, un des objectifs du projet étant de comparer les images Landsat-7 ETM+ et les images ASTER, seules les bandes qui partagent le même espace spectral sont conservées. Ainsi, la bande 9 du capteur ASTER est écartée, celle-ci n'étant pas dans le même domaine spectral qu'aucune bande de Landsat-7. L'évaluation s'est ensuite divisée en deux parties soit l'établissement des bandes pertinentes dans le visible/proche infrarouge et celles dans le moyen infrarouge.

Dans le domaine du visible/proche infrarouge, le processus pour déterminer les bandes les plus appropriées repose sur l'élimination de l'information superflue. Pour ce faire, un site test couvrant un territoire agricole est prélevé de l'image du 19 juillet 2001. À

partir des valeurs de réflectance des 3 bandes contenues dans le site, une matrice de corrélation est créée pour évaluer la récurrence d'information. Les coefficients de corrélation présents dans la matrice indique une forte association entre la bande 1 et la bande 2. De plus, la corrélation entre la bande 1 et la bande 3N est plus élevée que celle existant entre la bande 2 et la bande 3N. Sur la base de ces constats, la bande 1 semble accessoire. Les bandes 2 et 3N sont donc conservées. Cette sélection est d'autant plus justifiée que ces deux bandes (rouge et proche infrarouge) sont moins affectées par les effets atmosphériques par rapport aux autres bandes du VPIR (Smith et Fuller, 2001).

Dans l'espace du moyen infrarouge, le choix des bandes s'est opéré en référant au comportement spectral de la végétation. Ainsi, des pics de réflectance de végétation sont observés à 1,65  $\mu\text{m}$  et 2,20  $\mu\text{m}$  (Bonn et Rochon, 1992). Les bandes 4 et 6 de ASTER étant centrées autour de ces valeurs, celles-ci présentent un plus grand intérêt que les bandes 5, 7 et 8.

En résumé, les bandes 2, 3N, 4 et 6 du capteur ASTER semblent constituer la meilleure combinaison de bandes dans un contexte de classification d'un territoire agricole.

Toujours dans une optique de comparaison, le choix des bandes du satellite Landsat-7 ETM+ est en lien direct avec la sélection des bandes du capteur ASTER. De la même façon que les bandes thermiques d'ASTER ont été abandonnées, la bande 6 de Landsat-7 ETM+ n'est pas conservée. La bande 1 est écartée étant donné l'absence de bande correspondante pour le capteur ASTER (voir Figure 4.2). Par la suite, la bande 2 est mise de côté car elle occupe le même domaine spectral que la bande 1 de ASTER qui a été délaissée. Il ne reste donc que les bandes 3, 4, 5 et 7 qui seront utilisées pour les classifications.

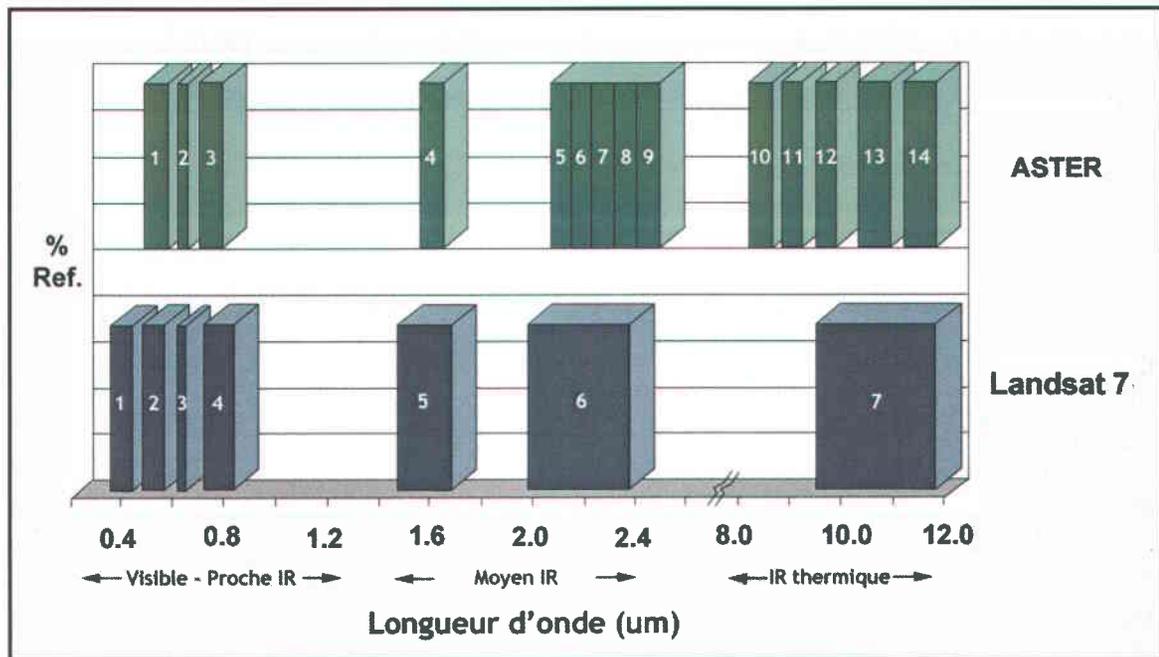


Figure 4.2 : Espace spectral occupé par les bandes des capteurs ASTER et Landsat-7 ETM+ (inspiré de Adams et al., 2002)

#### 4.1.2.2 Transformations géométriques

Les transformations géométriques consistent à modifier la géométrie implicite de l'image de façon à ce qu'elle soit le plus près possible d'une planimétrie cartographique (Caloz et Collet, 2001). De plus, elles permettent d'associer des coordonnées aux pixels de l'image dans le but de situer dans un espace de référence spatiale la scène acquise par le capteur. Les transformations géométriques sont composées de deux opérations distinctes. La première étape est l'assignation des coordonnées au nouveau pixel : la géoréférence. La seconde comporte le calcul de la valeur du nouveau pixel. Cette dernière se traduit par une opération d'interpolation qui est dénommée rééchantillonnage.

Comme le soulignent Caloz et Collet (2001), deux approches de transformation géométrique ont été développées. L'une, appelée locale, tient compte des données sur le relief du territoire qui sont à la disposition de l'analyste et amène à la création d'une orthoimage. L'autre est dite globale et s'appuie sur une transformation qui s'applique sur l'ensemble de l'image lorsque l'analyste ne dispose pas de modèle numérique de terrain (MNT). Dans le cas présent, c'est la dernière méthode qui a été privilégiée malgré la disponibilité de données décrivant le relief du bassin. La raison

de ce choix s'appuie, d'une part, sur le fait que le bassin est peu étendu (29 km<sup>2</sup>) et comme mentionné précédemment, sa topographie est plutôt plane. D'autre part, la création du MNT remonte à quelques années et il semble plus sûr de mettre de côté ces données dû à la confusion qui existe à savoir comment il a été conçu. En bref, l'impact de l'utilisation du MNT par rapport à la non utilisation de celui-ci lors des transformations géométriques a été ici jugé négligeable.

Le module Orthoengine du logiciel PCI Geomatica V.9.0 a été employé pour réaliser l'ensemble des transformations géométriques. Pour simplifier la procédure et accélérer le temps de calcul lors du rééchantillonnage, les images sont réduites de façon grossière pour couvrir le bassin versant de la Boyer Nord et les alentours. Ces sous-images sont par la suite géoréférencées selon la méthode polynomiale de degré 2.

Fondée sur les principes des transformations de systèmes de référence spatiale, la théorie entourant les transformations polynomiales est relativement simple. Il s'agit de transformer le système  $S'$  de l'image initiale, exprimé en unité de pixels et de ligne, en un système  $S$  géoréférencé dont les axes de coordonnées correspondent à ceux de la cartographie locale utilisée. Dans ce cas-ci, le système de coordonnées géographiques de référence est le système de projection Mercator Transverse Modifié (MTM), zone 7, et le datum de référence est le NAD83. Le choix de ce système s'impose naturellement car il a été utilisé par défaut dans les travaux antérieurs sur le bassin de la Boyer Nord. Les caractéristiques de ce système sont exposées à l'annexe B.

La transformation de degré 2 offre des résultats optimaux parmi les transformations par polynômes. En effet, l'utilisation d'un polynôme de degré 2 permet un meilleur positionnement des pixels qu'un polynôme de degré 1 tout en évitant les incohérences que pourrait engendrer l'utilisation d'un polynôme de degrés supérieurs (Caloz et Collet, 2001). Pour résoudre le jeu d'équations d'une transformation polynomiale, il est nécessaire de connaître un nombre minimum de coordonnées des pixels dans l'image. Dans le cas d'une transformation de degré 2, ce minimum est de 6 pixels connus. Donc, 12 coordonnées sont essentielles. C'est à ce moment que les orthophotographies obtenues du MRN se révèlent utiles. À l'aide de celles-ci, des

points dits d'appui sont sélectionnés dans les orthophotos et leur correspondance dans l'image satellitaire est établie. Il faut ainsi choisir un couple de points facilement identifiables dans les deux systèmes. Il est conseillé de récolter un nombre de points d'appui bien plus élevé que le minimum nécessaire (Richards, 1993).

Pour les images ASTER, une quinzaine de points d'appui, en moyenne, sont identifiés et utilisés pour géoréférencer les bandes du visible et du proche infrarouge. Un décalage entre les bandes du moyen infrarouge (MIR) a forcé la sélection d'une nouvelle série de points d'appui pour chaque bande du moyen infrarouge. Ce décalage semble inhérent au système MIR malgré le fait qu'aucune documentation ne relate ce problème majeur. Le processus de transformations géométriques des images ASTER s'en voit donc rallongé de beaucoup. En ce qui concerne les images Landsat-7 ETM+, une quinzaine de points d'appui, en moyenne, sont aussi sélectionnés pour faire la géoréférence de toutes les bandes du capteur. Une attention particulière est apportée pour s'assurer que les points d'appui soient collectés sur l'ensemble de l'image et le plus uniformément possible (Richards, 1993). Les erreurs résiduelles (RMS) obtenues lors de la prise de points d'appui se doivent d'être inférieures à 1 pixel pour chaque image avant d'engendrer la conversion de système. Cette condition est respectée pour toutes les transformations effectuées. Des détails statistiques concernant les erreurs résiduelles sont présentés à l'annexe C.

Une fois les points d'appui choisis, le transfert d'un système vers l'autre s'effectue et il faut opter pour une méthode de rééchantillonnage. À la suite de l'opération de géoréférence, les pixels de la nouvelle image ne se retrouvent habituellement pas aux mêmes endroits que sur l'image originale. Aussi, il faut estimer la valeur des nouveaux pixels par l'interpolation des valeurs affectées aux pixels de son voisinage dans l'image originale. C'est l'opération de rééchantillonnage. Lors de cette étape, les bandes 4 et 6 du capteur ASTER sont suréchantillonnées pour convertir leur limite de résolution de 30 m à 15 m.

Pour finir, les sous-images transformées géométriquement sont réduites à nouveau, mais cette fois selon un patron identique pour chaque image. Cette opération est primordiale pour pouvoir éventuellement comparer le contenu des images entre elles. Cependant, pour ce faire, il est essentiel de normaliser la dimension des pixels et

subséquentement des images du capteur Landsat-7 ETM+ en fonction de celles du capteur ASTER. Les images Landsat-7 ETM+ géoréférencées sont ainsi rééchantillonnées avec une dimension de pixel de 15 m. Un pixel de 30 m devient quatre pixels de 15 m. Enfin, les images ASTER et Landsat-7 ETM+ sont réduites selon le patron établi. Le tableau 4.2 présente les caractéristiques de ce patron.

Tableau 4.2 : Caractéristiques de la réduction uniforme des images géoréférencées

Dimension de l'image	Pixels	547
	Lignes	648
Coin supérieur gauche l'image*	Est (m)	263 505
	Nord (m)	5 174 220
Coin inférieur droit de l'image*	Est (m)	271 710
	Nord (m)	5 164 500

\*Les coordonnées sont exprimées en MTM Zone 7, datum NAD83

#### 4.1.2.3 Transformations radiométriques

Les transformations radiométriques ont pour but de rehausser la qualité de l'image et de transformer le contenu de la scène en valeurs physiques quantifiables. Dans la littérature, les transformations radiométriques précèdent généralement les transformations géométriques dans l'ordre défini du cheminement des prétraitements. Cependant, pour réduire le temps de traitement, il semble plus pertinent de transformer uniquement une sous-image couvrant le bassin plutôt que la scène en entier. Pour s'assurer de l'homogénéité entre les capteurs lors de la création de ces sous-images, il est indispensable de réaliser les transformations géométriques qui s'imposent. Dans le cadre du projet, les transformations radiométriques sont donc appliquées aux images issues des étapes de transformations géométriques.

Les transformations radiométriques réalisées diffèrent selon la provenance des images traitées. Ainsi, la présente section aborde de manière indépendante les

transformations radiométriques des images du capteur ASTER et celles des images du capteur ETM+ du satellite Landsat-7.

En ce qui concerne le capteur ASTER, les transformations radiométriques se divisent en deux étapes. La première vise à déterminer les valeurs de luminance des pixels de l'image. La seconde consiste à obtenir, à l'aide des valeurs de luminance, la réflectance de chaque pixel.

Les images ASTER sont enregistrées dans un format de fichier nommé HDF. Le format HDF permet de stocker plusieurs couches d'information de différentes natures dans un seul et même fichier. Ainsi, dans les fichiers HDF d'une image ASTER, il est possible de retrouver des données prises par le capteur visible/proche infrarouge, le capteur moyen infrarouge, le capteur thermique, en plus des tables de corrections radiométriques, géométriques et d'autres métadonnées qui se présentent dans un format texte.

Pour l'obtention de la luminance, l'utilisation des paramètres de correction enregistrés dans le fichier HDF de l'image est préconisée. Ces paramètres de correction permettent la conversion des comptes numériques en luminance spectrale qui est exprimée en  $W/m^2/sr/\mu m$ . Pour obtenir ces valeurs physiques, la fonction « ASTER Radiance » du logiciel ENVI 4.0 est employée. La fonction traite les bandes selon l'accès HDF, c'est-à-dire que les bandes visible/proche infrarouge sont traitées une à la fois et les autres bandes sont traitées en bloc. La transformation se déroule en arrière-plan et elle est peu documentée. L'aide du logiciel indique que la transformation pour les images du niveau 1A (niveau d'acquisition) constitue une calibration complète et directe permettant l'obtention d'une image composée de luminance spectrale. La bande obtenue est enregistrée dans un format 32 bits (réel) du fait que les comptes numériques contiennent des valeurs avec des décimales. En plus de l'obtention d'une image en luminance, l'effet de lignage est en grande partie corrigé par l'utilisation de la fonction.

La réflectance est définie comme le rapport de flux radiatif réfléchi par un milieu matériel au flux radiatif incident, dans une bande spectrale et s'exprime généralement en pourcentage. Dans le but de mieux comparer les images ASTER entre

elles, la transformation des valeurs de luminance en valeurs de réflectance est essentielle. De cette façon, l'éclairement solaire ainsi que l'angle d'observation du capteur sont normalisés pour chaque image. On obtient des valeurs de réflectance en utilisant la formule 1 suivante :

$$\rho_k = \frac{\pi u_t^2 L_{ap,k}}{\cos \theta_s E_{ap,k}} \quad \text{où} \quad \rho_k = \text{réflectance} \quad (1)$$

$u_t$  = facteur de correction pour la distance Terre-Soleil

$\theta_s$  = angle zénithal solaire

$E_{ap,k}$  = éclairement solaire au niveau du satellite

$L_{ap,k}$  = luminance apparente

Le facteur de correction est calculé selon l'équation 2 :

$$u_t = \frac{1}{[1 - e \cos(\eta t)]^2} \quad \text{où} \quad u_t = \text{facteur de correction pour la distance Terre-Soleil} \quad (2)$$

$e$  = excentricité de l'orbite  
(0,01673)

$\eta$  = angle de rotation moyen  
(0,0172 rad/jour)

$t$  = nombre de jours comptés à partir du 1/1/1950 à la date de la prise d'image

La version 9.0 du logiciel PCI Geomatica ne possède pas de fonctionnalité permettant de transformer facilement et rapidement des valeurs de luminance en valeurs de réflectance. Il faut donc calculer, dans un chiffrier électronique, les différents paramètres contenus dans les équations précédentes. Les paramètres d'éclairement solaire ont été déterminés pour les trois bandes du visibles/proche infrarouge et les bandes 4 et 6 du moyen infrarouge à l'aide des données obtenues par les chercheurs oeuvrant sur le programme ASTER<sup>1</sup>. Les résultats obtenus sont les suivants :

<sup>1</sup> <http://staff.aist.go.jp/s.tsuchida/aster/cal/info/solar/>

Tableau 4.3 : Éclairement solaire moyen au niveau du satellite ASTER

Bandes	Domaine spectral ( $\mu\text{m}$ )	Éclairement solaire moyen au niveau du satellite ( $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$ )
2	0,63 - 0,69	1583,17
3N	0,78 - 0,86	1098,34
4	1,60 - 1,70	232,88
6	2,185 - 2,225	80,12

L'angle zénithal solaire pour chaque date est déterminé à l'aide de la fonction « Atmospheric Correction » du logiciel PCI Geomatica. Ensuite, possédant tous les paramètres utiles à la transformation des luminances en réflectances, la formule est appliquée à chaque image à l'aide de la fonction « Modelling » dans PCI Geomatica. Les images résultantes sont dans un format 32 bits, et contiennent des valeurs de réflectance exprimées en pourcentage.

Les images LANDSAT-7 ETM+ sont de niveau 1G (niveau d'acquisition) et sont livrées dans le format HDF. Les images de ce niveau d'acquisition ont déjà été converties en valeurs de luminance. Une seule étape de transformations radiométriques est nécessaire, soit le changement des luminances en réflectances. Pour ce faire, le logiciel ENVI 4.0 est utilisé. L'outil « Calibration Utilites » pour Landsat TM de la fonction « Pre-processing » permet de charger les données essentielles dans le fichier HDF pour effectuer la transformation. Étant donnée la simplicité de l'opération, l'étape de transformation radiométrique est appliquée à la scène en entier pour les images Landsat-7 ETM+. Ainsi, contrairement au processus employé avec les images ASTER, les images ETM+ sont transformées au niveau radiométrique avant de l'être au niveau géométrique. Les images finales sont dans un format 32 bits, et contiennent des valeurs de réflectance exprimées en pourcentage.

#### 4.1.2.4 Autres prétraitements

Quelques précisions s'imposent concernant d'une part la réalisation d'un prétraitement distinct des précédents et d'autre part les transformations

atmosphériques. Tout d'abord, les valeurs de réflectance des images transformées radiométriquement et géométriquement sont multipliées par un facteur cent pour faciliter leur manipulation. En appliquant une transformation multiplicative, il est ainsi possible d'exploiter les valeurs de réflectance avec une meilleure précision, les logiciels de traitements d'images PCI Geomatica et eCognition ne considérant que les deux premiers chiffres suivant la virgule (ex : 0,1459 devient 14,59).

Comme le mentionne Bonn et Rochon (1992), la couche atmosphérique qui se situe entre la surface terrestre et le satellite de télédétection, modifie le signal reçu en troublant certaines propriétés du rayonnement électromagnétique. Les perturbations atmosphériques sont causées par deux entités différentes soit les molécules de gaz et les particules liquides ou solides (poussières, aérosols, gouttelettes, etc.). Celles-ci engendrent trois phénomènes d'interaction influençant le rayonnement : l'absorption, la diffusion et la réfraction. Il existe diverses transformations pour réduire les effets de l'atmosphère sur le rayonnement. Parmi celles-ci, des chercheurs (Song et al., 2001) mentionnent la méthode de l'élimination des bandes les plus fortement affectées par l'effet atmosphérique, à savoir celles dans le domaine spectral entre le violet et le vert ( $0,4 \mu\text{m}$  à  $0,55 \mu\text{m}$ ). Ces bandes ayant déjà été écartées lors de la sélection des bandes à traiter (section 4.1.2.1), il apparaît non justifié d'effectuer d'autres corrections atmosphériques. De plus, une importance moins grande est généralement accordée aux corrections atmosphériques lors d'études multi-temporelles de classifications comme la présente : leurs applications n'influencent pas de façon significative les résultats. En effet, les images sont comparées après avoir été classifiées de façon indépendante.

### 4.1.3 Classification

Le processus de classification d'images comporte plusieurs étapes variant selon la méthode employée et le type d'images à classifier. Les différentes approches explorées pour identifier les cultures sur les images Landsat-7 ETM+ et ASTER sont présentées dans cette section. La figure 4.3 illustre le cheminement employé lors des classifications.

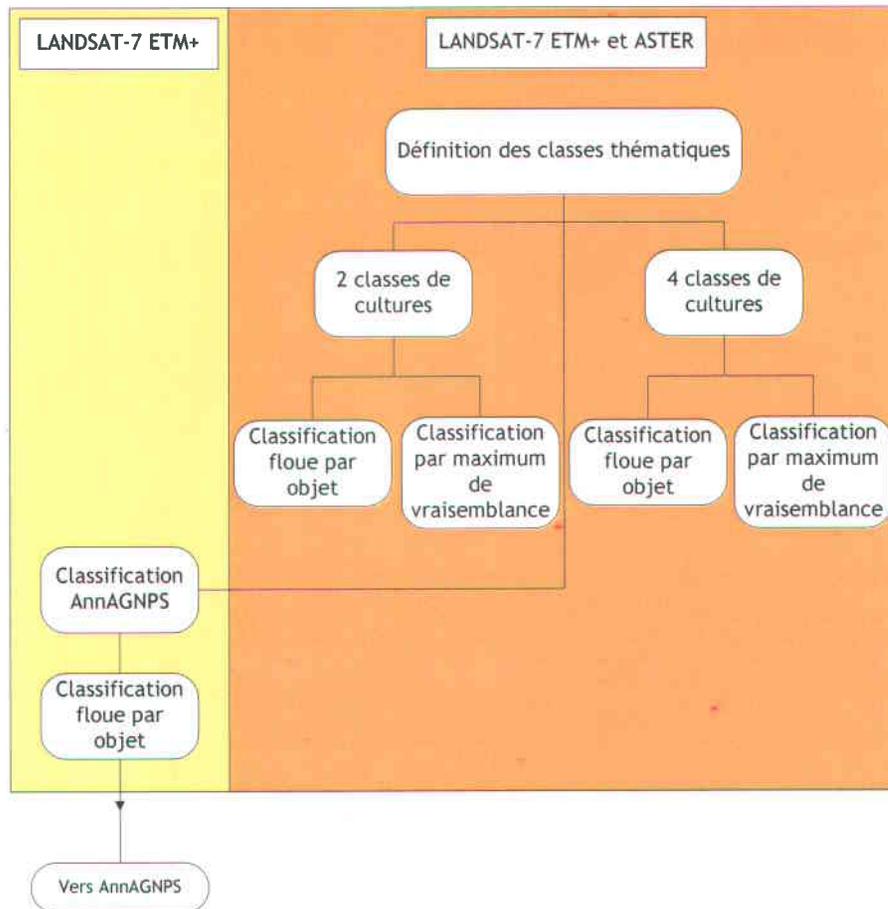


Figure 4.3 : Diagramme du processus de classification pour les images ASTER et Landsat-7 ETM+

#### 4.1.3.1 Définition des classes thématiques

En premier lieu, suivant la marche à suivre traditionnelle d'une classification dirigée, il est essentiel d'établir la définition des classes thématiques. Le concept de classe thématique réfère aux objets que l'analyste souhaite extraire de l'image. Ainsi, la classe thématique est définie selon une ou plusieurs propriétés semblables à tous les éléments qui la composent. La définition des classes thématiques dépend de plusieurs facteurs inhérents à la fois aux types d'images, aux données de vérités terrain et à l'objectif poursuivi par l'analyste. Dans le cadre du projet actuel, le choix des classes thématiques à identifier s'appuie principalement sur les données terrain qui sont disponibles et sur une analyse primaire des objets dans l'image.

Les travaux d'enquêtes auprès des agriculteurs réalisés pour les années 1999 et 2000 ont amené l'identification de 32 classes de cultures (tableau 4.4). Ces identifiants de

culture ont ensuite été regroupés pour former les codes de gestion AGNPS (tableau 4.5) qui ont été utilisés dans le modèle de simulation comme intrants (Chardonneau, 2000).

Tableau 4.4 : Identifiants des cultures suite à l'enquête auprès des agriculteurs (1999-2000)

Id Culture	Cultures
1	Leg+40 ent
2	Mais ensilage
3	Blé
4	Orge grainée
5	Pâturage graminée
6	Mais grain
7	Soya
8	Foin (trèfle-mil)
9	Foin (dactyle)
10	Foin (mil)
11	Prairie+40% leg.
12	Pâturage+60% gram.
13	Prairie+60% gram.
14	Moutarde blanche
15	Prairie+80% leg.
16	Avoine
17	Trèfle
18	Ble-avoine
19	Aucun
20	Grains mêlés
21	Triticale-pois
22	Engrais vert
23	Prairie semis
24	Canola print.
25	Orge pure
26	Foin (dactyle-brome)
27	Foin (mil-luzerne)
28	Avoine-trefle
29	Foin (brome-mil)
30	Pâturage (trèfle blanc-gram)
31	Herbe (gazon)
32	Foin (trèfle-mil-luzerne)

Tableau 4.5 : Codes de gestions AGNPS établis par Chardonneau (2000)

Id Code	Type de gestion
1	Avoine
2	Blé
3	Canola
4	Engrais vert
5	Foinbv
6	Foinpc
7	Mais ensilage
8	Mais grain1 bv
9	Mais grain1 pc
10	Mais grain2 bv
11	Mais grain2 pc
12	Mais grain3
13	Paturagebv
14	Paturagepc
15	Orge
16	Pâturage ou foin
17	Soya

Les définitions complètes associées aux acronymes des identifiants de cultures (tableau 4.4) sont floues étant donné l'absence d'information précise liée à leur provenance. En effet, ces identifiants sont utilisés dans la base de données de la Boyer Nord mais la documentation relatant leur signification précise reste introuvable. Nonobstant ce vide, il est impossible d'envisager la création de classes thématiques pour les classifications qui correspondent à chaque classe de culture identifiée lors des entrevues, les capacités de la télédétection étant limitées. D'ailleurs, de nombreuses cultures semblent avoir été regroupées lors de la création des codes de gestion AGNPS. Ainsi, selon les codes de gestion établis (tableau 4.5), neuf grandes cultures ou occupation du sol sont reconnues : Avoine, Blé, Canola, Engrais vert, Foin, Maïs, Paturage, Orge, Soya. Le but du projet n'est pas de modifier la structure du modèle de simulation AnnAGNPS en fonction des données de télédétection mais plutôt le contraire. Il semble donc à première vue que les classes thématiques doivent représenter ces types de cultures. Toutefois, l'opération de conversion des identifiants de culture en codes de gestion AGNPS est elle aussi mal documentée et très obscure. De plus, les codes de gestion traduisent un aspect plus large que la simple occupation du sol. En effet, le tableau 4.5 montre que plusieurs types de gestion sont accompagnés d'acronymes qui désignent le type de fertilisant utilisé (pc : porcin, bv : bovin) et qui sert de discriminant entre deux codes de gestion ayant la même culture. Par exemple les codes « Maïs grain 1 bv » et « Maïs grain 1 pc »

représentent la même culture soit le maïs mais fertilisée différemment. Il est donc jugé plus intègre d'utiliser les données contenant les identifiants de cultures (tableau 4.4) comme vérité terrain. Afin de cibler les cultures dominantes, une analyse de superficie à l'aide d'outils SIG est effectuée sur les données du bassin versant de la Boyer Nord. Les résultats de cette analyse indiquent que les cultures de maïs, de leg+40 ent (une forme probable de légumineuses mais non identifiée précisément), de foin et de prairies occupent plus de 80 % du territoire cultivé pour les années 1999 et 2000. L'annexe D présente en détail les résultats de cette analyse. Suite à cet examen, il est décidé d'intégrer dans la définition des classes thématiques, les classes maïs, légumineuses et foin. Les cultures prairies sont incorporées dans la classe foin étant donné l'ambiguïté sémantique qui existe entre ces définitions de cultures. Les agriculteurs entre eux ne font pas toujours les mêmes différenciations lorsque qu'ils décrivent ces deux cultures. Enfin, à l'aide de la vérité terrain et du logiciel eCognition, une inspection des propriétés spectrales des autres cultures est effectuée dans le but de détecter celles possédant des caractéristiques distinctives. Grâce à cette analyse, seule la culture de blé s'avère plus facilement identifiable. En plus des quatre classes de culture, les classes d'eau, de forêt mixte, de forêt de conifères et de zones urbaines sont incorporées dans la définition des classes thématique (Tableau 4.6).

Tableau 4.6 : Définition de classes thématiques avec 4 classes de cultures

Classes thématiques
Forêt mixte
Conifères
Légumineuses
Foin
Maïs
Blé
Zones urbaines
Eau

Un examen rapide de la correspondance entre les identifiants de culture et les codes de gestion AGNPS révèle que la classe « leg+40 ent » est associée aux classes « foin ».

Dans le but d'évaluer la confusion possible entre les légumineuses et le foin, des classes de niveau supérieur sont créées pour former une seconde définition de classes thématiques. Ainsi, les légumineuses et le foin sont regroupés sous la définition prairies et le blé et le maïs, sous la définition céréales. Le tableau 4.7 illustre cette seconde définition de classes thématiques.

Tableau 4.7 : Définition de classes thématiques avec 2 classes de cultures

Classes thématiques
Forêt mixte
Conifères
Prairies
Céréales
Zones urbaines
Eau

La première étape du processus de classification dirigée est donc complétée. Deux définitions de classes thématiques sont instituées et elles seront utilisées tant pour la méthode de classification floue par objet que pour la méthode du maximum de vraisemblance.

#### 4.1.3.2 Classification floue par objet

Comme mentionné précédemment, le logiciel eCognition de la compagnie allemande Definiens Imaging est à ce jour un des rares outils commerciaux appliqué à la télédétection qui permet d'effectuer des classifications floues par objet. La version 3.0 d'eCognition est ici exploitée. La démarche respectée pour les classifications et décrite dans les paragraphes suivants s'applique aux images ASTER et Landsat-7 ETM+.

La première opération consiste à segmenter l'image en objets. En plus des bandes de l'image, des données vectorielles sont mises à contribution lors de l'étape de la segmentation. Ces données vectorielles sont en format « shape » et proviennent en partie des travaux de Landry (2001). Elles décrivent le territoire du bassin versant de la Boyer Nord et elles contiennent les limites des parcelles exploitées telles qu'indiquées par les agriculteurs interrogés lors des entrevues. De plus, les limites des

zones urbaines, de la rivière Etchemin et des espaces de forêt ont été numérisées à partir de la mosaïque des orthophotographies du MRN et sont incorporées dans le fichier de données vectorielles. Enfin, des données des limites cadastrales à l'extérieur du bassin simulé y ont été jointes pour former le fichier illustré à la figure 4.4. La description complète du processus de création du fichier vectoriel est présenté en annexe (annexe E).

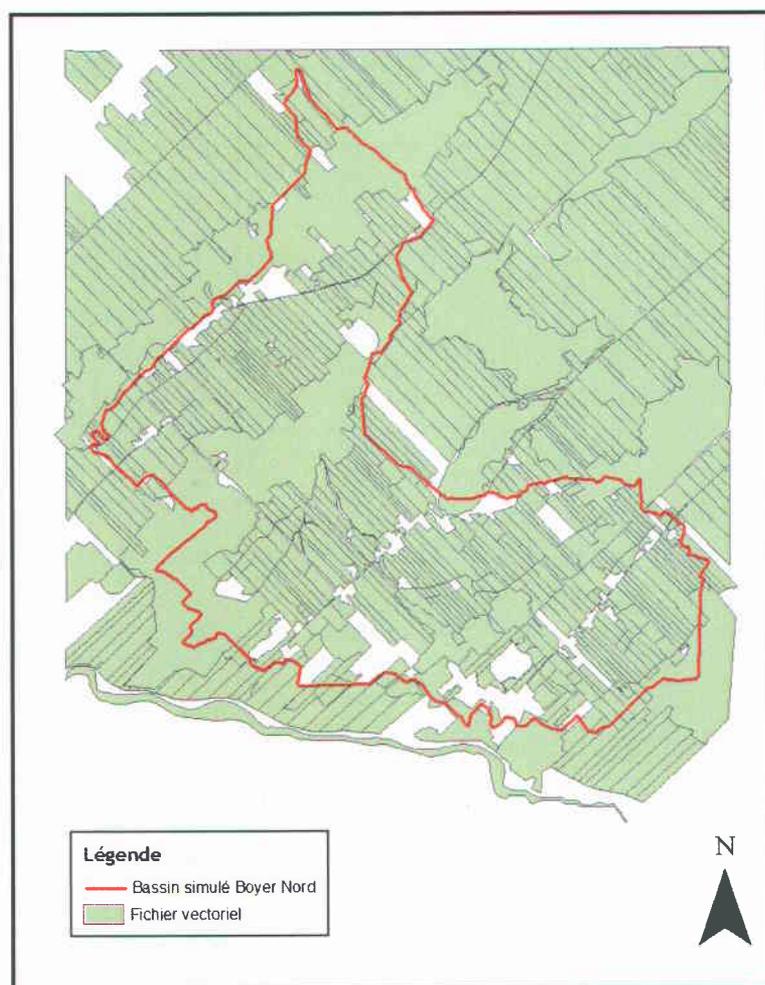


Figure 4.4 : Données vectorielles du bassin de la Boyer Nord

L'avantage majeur de l'utilisation de ces données vectorielles réside dans la collaboration des agriculteurs à fournir les divisions de leur lot cadastral en parcelles cultivées. Ainsi, en ajustant les paramètres de segmentation, il est possible d'obtenir des objets uniques selon les limites des parcelles. Ces objets représentent ainsi des zones de cultures homogènes. La classification est inévitablement facilitée car chaque

objet créé par la segmentation contient normalement des pixels ayant des caractéristiques spectrales très similaires. Les paramètres de segmentation utilisés pour obtenir ces résultats sont exposés dans le tableau 4.8. La signification des paramètres de segmentation peut être retrouvée dans le manuel d'eCognition (Definiens Imaging GmbH, 2002).

Tableau 4.8 : Paramètres de segmentation

Facteur échelle (scale)	50
Couleur (color)	0,2
Forme (shape)	0,8
Lissage (smoothness)	0,1
Compacité (compactness)	0,9

Le choix des valeurs des paramètres de segmentation est guidé par la recherche d'objets homogènes correspondant aux parcelles. De plus, à la lecture des travaux de Flanders (Flanders et al., 2003) et du manuel d'eCognition (Definiens Imaging GmbH, 2002), il apparaît qu'avec des images de haute résolution (15 m) et dans un contexte d'identification de parcelles rectangulaires, il est préférable de mettre l'emphase sur les paramètres de forme et de compacité au détriment de ceux de couleur et de lissage. Cette opération amène la création de 1468 objets dans l'image Landsat-7 ETM+ et 1460 dans l'image ASTER

La segmentation étant complétée, la prochaine étape consiste à lancer la classification floue. Pour ce faire, il est préalablement nécessaire de définir les critères de décision qui définissent l'appartenance d'un objet à une classe thématique. Ceux-ci sont établis à l'aide de la vérité terrain et en étudiant méthodiquement les propriétés des objets. Pour ces classifications, les caractéristiques spectrales et les relations entre les classes sont utilisées. Tous les critères sont présentés de façon détaillée pour les deux types d'images à l'annexe F. Il est important de saisir que leur création est intimement reliée à la perception de l'analyste. Ainsi, leur définition peut varier d'un analyste à un autre. De plus, il s'agit d'un processus itératif et empirique où ils sont modifiés jusqu'à ce que les objets créés se rapprochent le plus de la vérité terrain.

Une fois les conditions d'appartenance définies, le processus de classification floue est divisé en deux opérations. La première est de lancer une classification uniquement avec les classes thématiques de forêt mixte et de conifères. Par la suite, la fonction « Classification-based Segmentation » est utilisée pour lier les objets voisins de même nature. Cette fonction permet de construire de nouveaux objets sur un niveau supérieur en fusionnant des objets qui appartiennent à une même classe thématique et qui partagent des frontières communes. Cette première étape a pour but d'assurer l'homogénéité des objets couverts par des surfaces forestières. De grandes zones uniformes composées de forêts sont alors créées et des aberrations ou des situations peu probables, comme le fait de retrouver un petit champ de blé encerclé de conifères, sont évitées. Suite à l'application de cette fonction, le nombre d'objets est ramené à 1409 pour l'image Landsat-7 ETM+ et 1403 pour l'image ASTER. La seconde opération est de charger la définition de classes thématiques comprenant toutes les classes d'occupation, et de lancer la classification floue sur le niveau contenant les objets conçus lors de la première opération. Il est important de mentionner que le critère minimum d'appartenance n'a pas été modifié de sa valeur par défaut (0,115) durant tout le processus de classification. Ce critère définit le seuil minimum que la valeur d'appartenance d'un objet doit excéder pour appartenir à une classe thématique.

Le déroulement de la classification floue par objet se termine par l'évaluation de la qualité de celle-ci. Toutes les données d'occupation du sol à l'intérieur du bassin simulé, faisant office de vérité terrain, sont utilisées pour évaluer la précision des classifications. Les statistiques jugeant de la qualité sont calculées en fonction des pixels et non des objets pour pouvoir les comparer avec celles issues des classifications par maximum de vraisemblance. L'indice Kappa est employé comme indicateur de qualité des classifications de même que l'indice de précision moyenne. Les matrices de confusion ont aussi été étudiées. L'annexe G contient des explications concernant ces trois indicateurs. Enfin, le pourcentage de pixels non classés suite au processus de classification est évalué pour juger de l'efficacité de ce dernier.

#### 4.1.3.3 Classification par maximum de vraisemblance

Les classifications par maximum de vraisemblance sont accomplies à l'aide de la version 9.0 du logiciel Geomatica de la compagnie canadienne PCI. Une approche traditionnelle est suivie lors de l'emploi de cette méthode de classification pour les images ASTER de même que pour les images Landsat-7 ETM+. Cette approche est énoncée dans la présente section.

En premier lieu, des zones d'entraînement, dont la nature de l'occupation du sol est connue grâce à la vérité terrain, sont identifiées sur l'image. Les pixels contenus dans ces zones et associés à une classe thématique sont utilisés dans l'algorithme de classification par maximum de vraisemblance. Les zones d'entraînement sont choisies de manière à ce qu'elles soient bien dispersées géographiquement sur l'image pour minimiser l'impact de biais locaux possibles. Elles doivent aussi être le plus représentatives possible des classes thématiques. Le nombre de pixels total dans les zones d'entraînement pour chaque classe respecte aussi la règle avancée par Brandt et Mather (2001) qui est de 30 fois le nombre de classes thématiques. C'est donc dire que pour 6 classes, un nombre de 180 pixels d'entraînement au minimum doit être recueilli pour chaque classe.

En second lieu, la classification est lancée. L'utilisation des quatre bandes des images est spécifiée. L'option « classe nulle » est activée pour ne pas forcer la classification. Cette option permet à l'algorithme de placer dans une classe dite inconnue des pixels qui ne correspondent statistiquement à aucune classe thématique. Cela évite d'associer des pixels ayant des caractéristiques faiblement similaires à des classes.

En troisième lieu, l'évaluation des classifications est exécutée. Suite à la classification, le logiciel PCI Geomatica produit un rapport de qualité concernant la classification. Les statistiques calculées pour l'évaluation de la précision de la classification s'appuient sur les pixels qui composent les zones d'entraînement. Ainsi, la qualité évaluée par cette méthode représente l'efficacité du logiciel à classer correctement les pixels des zones d'entraînement qui ont servi à établir les statistiques des classes thématiques. Cette méthode a pour effet d'introduire des résultats biaisés de manière positive. Dans le but d'éviter ce phénomène et d'être en mesure de comparer la qualité des deux techniques de classification, il est essentiel de

créer des zones de validation. Ces zones basées sur la vérité terrain sont différentes de celles d'entraînement et servent uniquement à quantifier la qualité de la classification. Un fichier contenant l'ensemble des occupations du sol connues a priori, mises à part celles utilisées comme zones d'entraînement est assemblé. Ce fichier est par la suite exporté dans un logiciel SIG où il est comparé aux résultats de la classification. De la même façon que lors des classifications floues par objet, l'indice Kappa et l'indice de précision moyenne sont employés comme indicateurs de qualité des classifications. Le calcul des pixels non classés est aussi réalisé.

#### 4.1.3.4 Classification AnnAGNPS

Suite à l'analyse des statistiques de qualité des classifications et d'une recherche plus en profondeur concernant le modèle AnnAGNPS, deux constats émergent.

Tout d'abord, seuls les résultats de la classification floue par objet réalisée sur l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 sont choisis et exploités comme données d'entrée d'occupation du sol au modèle. Deux raisons justifient cette décision. D'une part, l'application de la classification floue par objet semble donner de meilleurs résultats visuels et statistiques et s'inscrit davantage dans une approche parcellaire. D'autre part, dans les données préexistantes au projet, les codes de gestion AGNPS existent uniquement pour l'année 1999. La relation définissant la transformation des identifiants de culture aux codes AGNPS étant floue, il est impossible de retrouver ces derniers pour l'année 2000 et par conséquent il devient inconcevable de comparer les simulations « sans » et « avec » les données de télédétection pour l'année 2000.

Le second constat concerne les définitions de classes. Il a été décidé qu'une troisième définition de classes devait être employée (tableau 4.9). La création de cette nouvelle définition de classes est justifiée par l'étude plus approfondie des codes de gestions AGNPS et du fonctionnement du modèle. Il apparaît ainsi que certaines classes des premières définitions ne peuvent être pleinement exploitées par le modèle. La définition regroupe donc les classes forêts mixte et conifères sous une seule classe : forêt. Les classes légumineuses et foin ont quant à elles été unifiées pour obtenir une classe prairie. Cette définition de classe est ensuite utilisée pour classer uniquement l'image Landsat-7 ETM+ selon la méthode de classification floue

par objet. Cette classification dénommée « classification AnnAGNPS » est produite dans le seul but d'alimenter le modèle AnnAGNPS.

Tableau 4.9 : Définition de classes thématiques de la classification AnnAGNPS

Classes thématiques
Forêt
Prairies
Maïs
Blé
Zones urbaines
Eau

#### 4.1.4 Comparaison des images ASTER et Landsat-7 ETM+

Un des objectifs poursuivis dans le cadre de ce projet est d'évaluer la pertinence de l'usage des images ASTER par rapport aux images LANDSAT-7 ETM+. Pour pouvoir comparer ces deux types d'images, il faut utiliser des scènes de même date couvrant le même territoire. Ainsi, les scènes du 19 juillet 2001 sont appropriées pour l'atteinte de cet objectif. Étant donné que l'image ASTER du 19 juillet 2001 contient un petit nuage dans son cadran sud-est ce qui n'est pas le cas pour l'image Landsat-7 ETM+, il est important de créer deux sous-scènes couvrant exactement le même territoire pour étudier les propriétés de celles-ci et pouvoir les comparer dans des conditions idéales. La première étape du processus de comparaison consiste donc à créer des sous-images selon un patron identique (voir tableau 4.10). Ces scènes sont obtenues en utilisant les coordonnées du coin supérieur gauche et inférieur droit comme critères de réduction.

Tableau 4.10 : Caractéristiques du patron servant à la réduction uniforme des images du 19 juillet 2001

Dimension de l'image	Pixels	331
	Lignes	414
Coin supérieur gauche l'image*	Est (m)	264 255
	Nord (m)	5 172 990
Coin inférieur droit de l'image*	Est (m)	269 220
	Nord (m)	5 166 780

\*Les coordonnées sont exprimées en MTM 7, NAD83

Par la suite, les statistiques des bandes sont calculées pour chaque type d'images. Les valeurs de moyenne, de minimum, de maximum et d'écart type de réflectance sont obtenues pour les bandes. De plus, les fréquences des réflectances sont comptabilisées ce qui permet de générer facilement, avec un chiffrier électronique, les histogrammes des bandes. Dans le but de confirmer les phénomènes observés en comparant les images provenant des deux capteurs, un profil linéaire de réflectance est extrait de chaque image et analysé. La ligne 207 de chaque image formée de 331 pixels est sélectionnée de manière aléatoire. Étant donné le suréchantillonnage réalisé lors des prétraitements sur l'image Landsat-7 ETM+ et les bandes du moyen infrarouge d'ASTER, il convient de mettre de côté les colonnes impaires de pixels pour éviter la redondance d'information. Un graphique est ensuite créé pour illustrer le profil des pixels contenus dans l'image.

Enfin, il semble important d'inclure une évaluation visuelle des images effectuée par l'analyste malgré la subjectivité que cela implique. D'un côté purement esthétique, il est possible d'émettre une opinion en ce qui a trait à la qualité des images prises par les deux capteurs.

## **4.2 Transfert des résultats de la télédétection vers le modèle AnnAGNPS**

La présente partie du mémoire concerne l'utilisation du modèle agroenvironnemental AnnAGNPS alimenté par des données issues des classifications des images satellitaires. Il convient ici d'étudier les modalités de transfert des informations issues de la télédétection vers le modèle AnnAGNPS et de mettre en application ce dernier afin de vérifier si les images satellitaires constituent bien une source de donnée pertinente et suffisante. Les sections suivantes exposent les différentes étapes nécessaires au transfert des données et à l'obtention des résultats de simulation.

### **4.2.1 Analyse des données et choix des informations exploitables**

Comme mentionné précédemment, les travaux de Chardonneau (2000) ont mené à la création d'une base de données Access exhaustive contenant des informations recueillies sur le terrain auprès des agriculteurs. La structure de cette base de données est présentée à l'annexe H. Celle-ci contient une multitude d'informations comme les types de sol, les compositions exactes des fertilisants employés, les opérations aux champs, les noms des agriculteurs, etc. Dans l'optique de l'élaboration d'un protocole permettant le transfert des données de télédétection vers le modèle AnnAGNPS, nombre de ces données sont inutiles. De plus, l'objectif principal de cette recherche demeure la simplification du processus d'utilisation d'AnnAGNPS en éliminant la récolte fastidieuse d'informations. Néanmoins, il est utopique d'espérer retrouver les codes de gestion AGNPS en utilisant les classifications d'images comme source d'information unique. Il est alors nécessaire de coupler les données de télédétection avec des informations d'ordre général sur les parcelles.

Le choix des informations pouvant être associées aux classifications doit donc répondre aux conditions suivantes : les données doivent être facilement disponibles, invariantes d'une année à l'autre et permettre d'apporter des renseignements complémentaires aux données issues de la télédétection dans le but d'assigner des codes de gestion AGNPS aux occupations du sol.

L'analyse des différentes données contenues dans la base Access a permis d'identifier une information qui satisfait relativement bien aux conditions précédentes, soit les habitudes de fertilisation des agriculteurs. Il a été établi que plus de 75 % des agriculteurs du bassin ont recours à un type de fertilisant privilégié : les engrais bovins ou porcins (Henry, 2004). En alliant cette information avec les données des classifications d'images, il semble possible de retrouver de manière directe les codes de gestion AGNPS. Afin de simplifier l'accès aux données pertinentes, une nouvelle base de données Access a ensuite été élaborée et sa structure peut être consultée à l'annexe H.

## **4.2.2 Croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales**

Après avoir déterminé les informations utiles au transfert, il convient de combiner celles-ci avec les données vectorielles (parcelles du bassin, voir 4.1.3.2) et les données matricielles (classification de l'occupation du sol). Ce processus de croisement des données est divisé en trois étapes, soit : 1) l'identification des données à combiner, 2) la mise à jour de la base de données et la création d'indices exploitables et 3) le croisement comme tel.

### **4.2.2.1 Identifications des données requises**

En ce qui a trait aux données de télédétection, les résultats de la classification floue par objet réalisée sur l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec la définition de classes AnnAGNPS sont exploités pour le croisement des données. La classification AnnAGNPS contenant 6 classes (voir 4.1.3.4) est donc employée comme données matricielles d'occupation du sol.

Les données vectorielles utilisées dans le processus de croisement proviennent de deux sources. Tout d'abord, il y a les données sur les parcelles créées préalablement aux classifications floues par objet (voir 4.1.3.2). Ensuite, il y a le fichier de cellules AnnAGNPS. Celui-ci a été conçu par Chardonneau (2000) suite à une visite au National

Sedimentation Laboratory d'Oxford au Mississippi. Le fichier contient 464 cellules hydrographiques et peut être visualisé à l'annexe I.

Les données agroenvironnementales sont issues de la base de données Access nouvellement créée. Elle contient essentiellement des données sur les fertilisants choisis par les agriculteurs pour les parcelles données.

#### **4.2.2.2 Mise à jour de la base de données et création d'indices exploitables**

Jusqu'à présent, les bases de données utilisées raisonnent à l'échelle du champ. Cependant, en examinant de plus près les données vectorielles et agroenvironnementales, il a été constaté qu'un champ est souvent morcelé en plusieurs parcelles vouées à des cultures différentes. Pour remédier à cette situation, une clé primaire solide a été instituée afin de fonctionner à l'échelle de la parcelle. Ainsi, chaque parcelle possède un identifiant numérique unique, commun à la base de données Access et au fichier vectoriel des parcelles (Henry, 2004).

Dans le but d'exploiter les données d'habitude de fertilisation des agriculteurs, un indice de fertilisation a été conçu. Cet indice permet de différencier les fertilisations bovines (code 1) et porcines (code 100). Il est ensuite intégré dans le fichier vectoriel par le biais de la base de données Access.

#### **4.2.2.3 Croisement des données**

Le croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales s'effectue en trois étapes. Le premier croisement consiste à associer les valeurs d'occupation du sol (classification AnnAGNPS) et d'habitude de fertilisation aux données vectorielles des parcelles. Par la suite, le résultat de cette opération est transformé en format matriciel. Puis, le second croisement consiste à combiner les valeurs par parcelles modifiées précédemment avec les données vectorielles des cellules AnnAGNPS. La figure 4.5 illustre ce protocole qui est exposé plus en profondeur dans les paragraphes qui suivent.

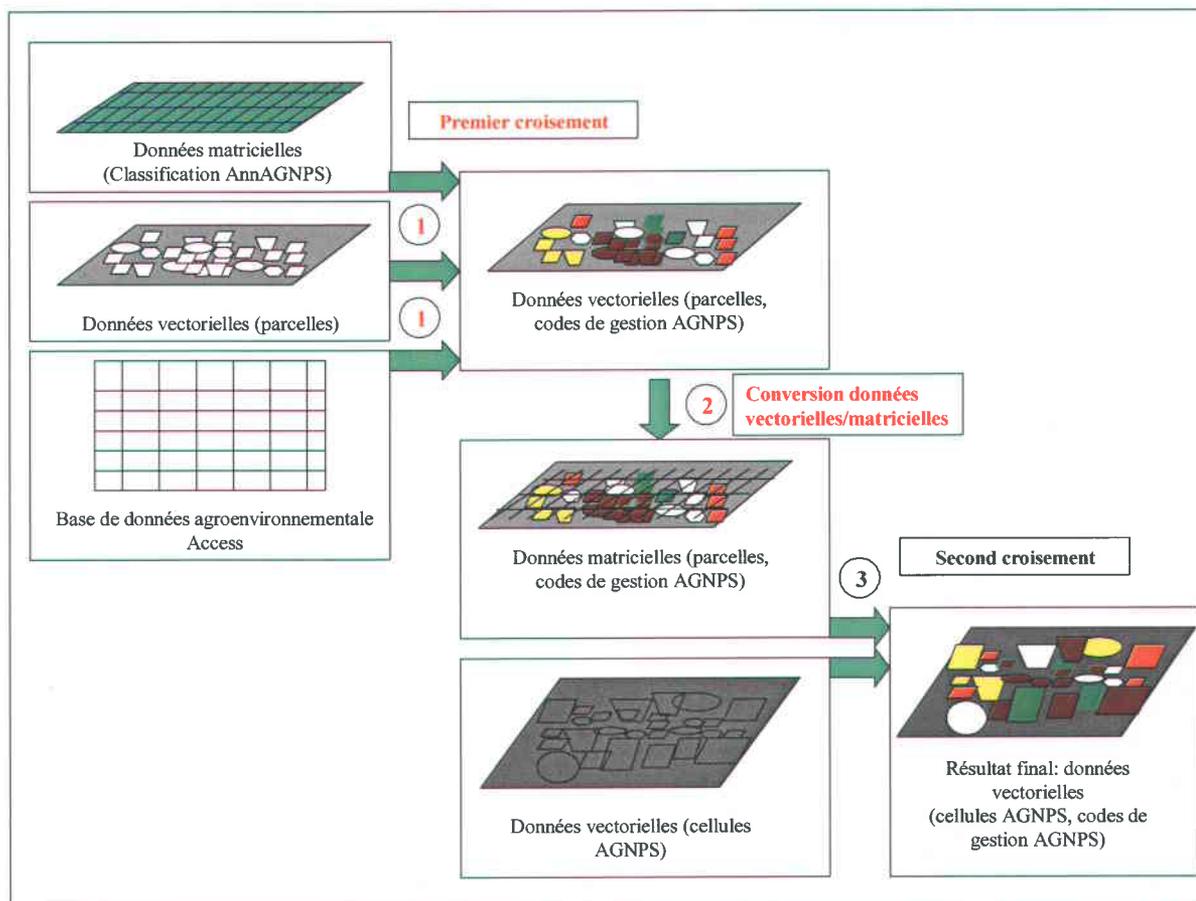


Figure 4.5 : Processus de croisement des données (inspiré de Henry, 2004 : 17)

La première étape du processus de croisement est réalisée à l'aide d'outils SIG. Les données vectorielles de parcelles du bassin simulé sont superposées aux données de classification de l'image satellite. Une fonction statistique SIG permet ensuite de déterminer l'occupation du sol qui couvre majoritairement la superficie de chaque parcelle. Ces données sont alors exportées dans la base de données Access. Celle-ci contient donc toutes les informations possibles pour obtenir de nouveaux codes AGNPS. Pour ce faire, les valeurs d'occupation du sol de la classification sont multipliées par les codes d'habitude de fertilisation et ce pour toutes les parcelles; les codes SIG sont ainsi obtenus. Une table de correspondance est ensuite produite pour associer ces codes SIG aux codes de gestion AGNPS (annexe J). Pour établir cette table, une analyse de superficie des codes de gestion AGNPS sur les cellules existantes a été effectuée (annexe D). Cette analyse a permis de cibler les codes les plus fréquemment retrouvés sur le bassin, ce qui a guidé la création de la table. Il est important de souligner que le choix des correspondances observe une logique justifiée

en fonction des informations disponibles. Enfin, ces codes résultants sont redirigés vers les données vectorielles des parcelles pour créer une carte de l'occupation du sol des parcelles selon les codes de gestion AGNPS.

Le fichier de cellule AnnAGNPS conduit au bon fonctionnement du modèle. En effet, ce dernier doit, dans le cas présent, obligatoirement être alimenté à partir des données contenues dans des cellules prédéfinies dont la forme et la disposition sont issues de la topographie et de l'hydrographie du bassin versant de la Boyer Nord. Dans le but de croiser les données vectorielles résultantes du premier croisement avec le fichier vectoriel de cellule AnnAGNPS, il est nécessaire de convertir un des deux fichiers en format matriciel. Effectivement, la fonction SIG ne permet pas le croisement de deux fichiers vectoriels. Il est donc décidé de convertir en format matriciel le fichier vectoriel issu du premier croisement (Henry, 2004).

La dernière étape (second croisement) consiste à superposer le fichier vectoriel des cellules AnnAGNPS sur le fichier matriciel des parcelles. La même procédure que lors du premier croisement est employée pour déterminer le code de gestion AGNPS majoritaire des cellules. Le résultat final montre le bassin sous la forme de cellules AnnAGNPS contenant des codes de gestion AGNPS obtenus à partir de la classification et des données agroenvironnementales.

### **4.2.3 Intégration des données dans le modèle AnnAGNPS**

Les étapes précédentes ont permis d'obtenir un fichier vectoriel subdivisé en cellules AnnAGNPS et contenant des valeurs d'occupation du sol, en format de codes de gestion AGNPS, dérivées de la classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 (classification AnnAGNPS). Il s'agit maintenant d'établir la manière d'intégrer ces codes dans le modèle de simulation.

Les données servant d'intrants au modèle AnnAGNPS sont introduites au niveau de l'éditeur (AnnAGNPS Input Editor). Tous les paramètres utiles à la modélisation doivent initialement être entrés manuellement au niveau de celui-ci. Dans le cas présent, l'objectif poursuivi consiste à modifier uniquement les codes de gestion AGNPS, les autres paramètres (dates, climats, forme et nombre des cellules,

composition des fertilisants, etc.) restent inchangés. Cet objectif, à première vue, semble facilement atteignable. Toutefois, différentes contraintes rendent plus complexe la réalisation de cette étape. Tout d'abord, le transfert direct de l'information depuis le fichier vectoriel final d'occupation du sol vers le modèle de simulation apparaît difficilement réalisable. En effet, la structure du fichier engendré par l'éditeur AnnAGNPS est singulière et ne permet pas une édition séquentielle, dans un chiffrier électronique par exemple (annexe K). Ainsi, l'option de copier simplement les données du fichier vectoriel pour les incorporer dans le fichier issu de l'éditeur, est abandonnée. Ensuite, une autre contrainte découle de la constitution du fichier vectoriel de cellule. Comme indiqué plus haut, le bassin de la Boyer Nord est composé de 464 cellules AnnAGNPS. Ce nombre étant relativement élevé, l'entrée manuelle des nouvelles valeurs serait fastidieuse et ne présente donc pas une solution souhaitable.

Ces contraintes exposées, la solution envisagée est de développer un dispositif qui permet de remplacer, de manière sélective, les codes de gestion AGNPS présents dans le fichier résultant de l'éditeur par les nouveaux codes obtenus grâce à la classification. Pour ce faire, une application spécifique programmée en langage Visual Basic est conçue. Le programme nécessite comme données d'entrée : le fichier de l'éditeur AnnAGNPS à modifier et un fichier contenant uniquement les nouveaux codes de gestion AGNPS. Un fichier de sortie est alors assemblé contenant toutes les informations du fichier original de l'éditeur à l'exception des codes de gestion AGNPS qui ont été remplacés par les nouveaux. Le code de l'application se retrouve à l'annexe K.

Finalement, le fichier de données d'entrée du modèle AnnAGNPS est complet tant au niveau de sa structure qu'au niveau de son contenu. Il est alors possible de faire fonctionner le modèle AnnAGNPS avec les données découlant de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999. Les résultats de cette simulation sont abordés à la section 4.2.5.

#### **4.2.4 Comparaison de l'occupation du sol obtenue par télédétection et par enquête sur le terrain**

Il est intéressant à cette étape de la recherche de comparer les résultats obtenus concernant l'occupation du sol par télédétection à l'occupation du sol établie selon l'enquête terrain. Cette comparaison mérite d'être explorée à deux niveaux, soit à l'échelle des cellules AnnAGNPS et à l'échelle parcellaire.

##### **4.2.4.1 Occupation du sol au niveau des cellules AnnAGNPS**

Dans le but d'évaluer la qualité de l'ensemble de la procédure appliquée aux données de télédétection, la comparaison du fichier des nouvelles cellules AnnAGNPS avec le fichier résultant des enquêtes terrain est d'abord réalisée.

Afin de quantifier les différences qui existent entre ces deux fichiers de sources différentes, des outils SIG sont employés. La simple comparaison des valeurs d'occupation de ces deux fichiers est en partie biaisée par la disparité des définitions de classes de chaque carte. Effectivement, les données originales obtenues suite aux entrevues contiennent encore plusieurs classes de codes de gestion AGNPS qui ont été, pour les données dérivées des classifications, éliminées ou regroupées lors de la procédure (voir sections 4.1.3.1 et 4.2.2.3).

Cette problématique force l'exploration d'une autre voie de comparaison pour les données à l'échelle cellulaire. Ainsi, une reclassification des codes de gestion s'est effectuée sur les données originales. Une table de correspondance est établie et par la suite, les fichiers sont comparés de nouveau à l'aide des mêmes outils SIG (annexe J). La création d'une matrice de confusion découlant de cette comparaison permet de mieux comprendre et expliquer les différences existantes.

##### **4.2.4.2 Occupation du sol au niveau des parcelles**

La comparaison des résultats à l'échelle de la parcelle permet de mieux estimer la perte d'information qui est probablement occasionnée par la conversion du système parcellaire vers le système de cellules AnnAGNPS. De plus, les résultats au niveau de la parcelle traduisent directement la qualité de la classification. Le produit de cette

comparaison devrait donc converger vers l'ordre de grandeur des statistiques obtenues lors de l'évaluation de la qualité des classifications floues par objet. De la même façon que pour les cellules, la comparaison au niveau des parcelles est réalisée à l'aide d'outils SIG. À noter que la comparaison parcellaire est uniquement réalisée sur les données recodifiées selon la même table de correspondance utilisée en 4.2.4.1.

#### **4.2.5 Simulations AnnAGNPS**

Les fichiers d'entrée étant complets, l'étape suivante consiste à lancer la simulation avec ceux-ci. Cette partie consiste en fait à effectuer deux simulations différentes : l'une utilisant les données issues de l'enquête terrain et l'autre faisant intervenir les données issues des données de télédétection. Les résultats recherchés sont basés sur les travaux antérieurs de l'INRS-ETE exposés dans le rapport de recherche R-625 (Proulx et al., 2002). Ainsi, trois grandes classes de sorties sont analysées.

En premier lieu, les sorties totales mensuelles au niveau de l'exutoire sont compilées et ce, pour le volume d'eau, les sédiments en suspension, l'azote et le phosphore. Ces résultats sont comparés aux données recueillies lors des travaux terrain à la station hydrométrique 008, située à l'exutoire du bassin. Ainsi, il est possible de juger de la qualité des simulations par rapport à des mesures fiables. Par la suite, des cartes de qualité et quantité de l'eau dans les tronçons sont créées pour les paramètres de volume d'eau, de concentration de sédiments en suspension, de concentration en azote et de concentration en phosphore. Enfin, des cartes illustrant la contribution des cellules en sédiments en suspension, leur production en sédiments en suspension et leur contribution au niveau de l'azote sont produites. Il est important de rappeler que toutes ces sorties sont comptabilisées pour les deux fichiers d'entrées.

Afin de mettre en forme tous ces résultats de façon simple, une application Visual Basic est développée. Celle-ci permet d'obtenir les résultats recherchés dans un format facilement exploitable tant pour la production de cartes que pour la création de graphiques. Le code du programme se retrouve à l'annexe K.

## 5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

Cette section présente les résultats des classifications, de la comparaison des capteurs, du transfert des données des classifications vers le modèle AnnAGNPS et des simulations avec ces nouvelles données. La discussion qui suit la présentation des résultats est divisée de manière à répondre aux trois hypothèses avancées dans l'introduction.

### 5.1 Résultats

#### 5.1.1 Résultats des classifications

Les résultats des classifications sont dévoilés selon les capteurs. Les images résultantes des classifications sont tout d'abord exposées. En ce qui a trait à la classification floue par objet, les résultats de la segmentation de même que ceux de la fusion sont présentés. Puis, les classifications avec deux classes de cultures et avec quatre classes de cultures sont illustrées. Pour toutes ces figures, la flèche du Nord pointe vers le haut parallèle à l'orientation des images. De même, les échelles utilisées varient d'environ 1 : 60 000 pour les figures présentées dans un format portrait et d'environ 1 : 50 000 pour celles dans une mise-en-page paysage. Ensuite, des tableaux comparatifs des deux méthodes de classification, par maximum de vraisemblance et floue par objet, sont produits. Ces tableaux intègrent les deux indices de qualité, l'indice Kappa et l'indice de précision moyenne, de même que le pourcentage de pixels non classés dans le but d'évaluer et d'analyser les classifications. Deux catégories de résultats sont uniques au capteur Landsat-7 ETM+. Il s'agit de la classification AnnAGNPS et de la matrice de confusion qui l'accompagne.

## 5.1.1.1 Image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

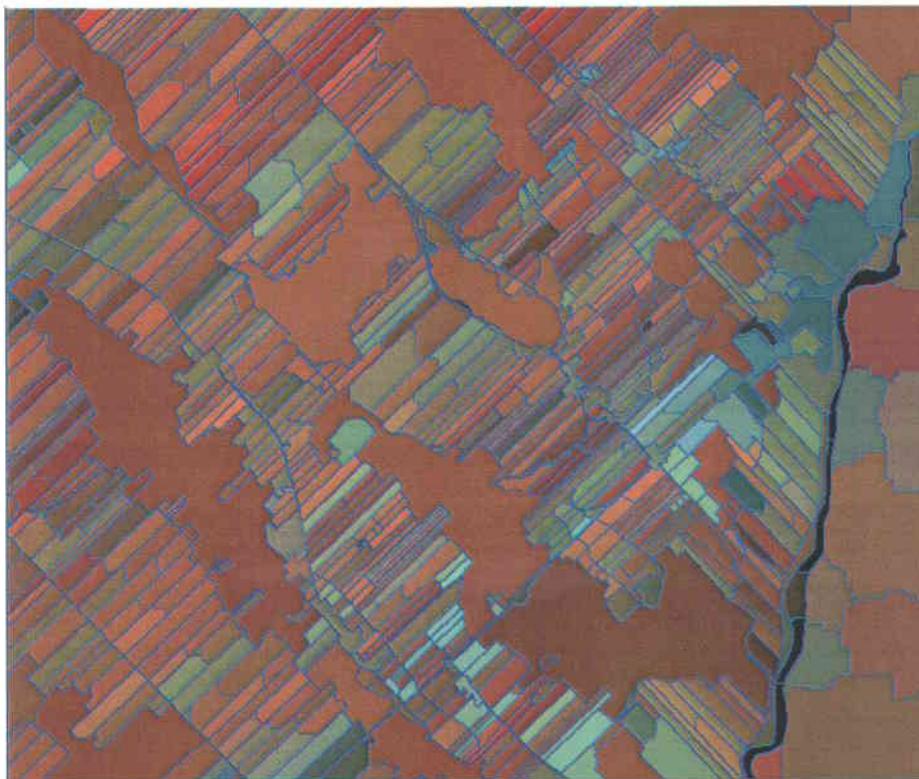


Figure 5.2 : Fusion des zones forestières de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 4, 5 et 7)

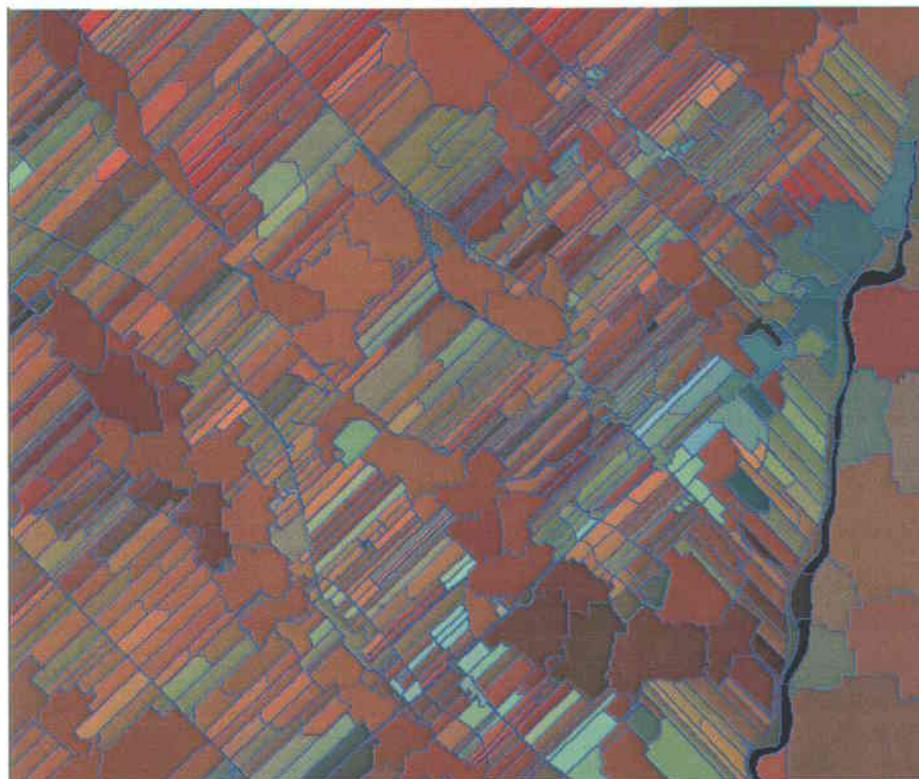


Figure 5.1 : Segmentation de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 4, 5 et 7)

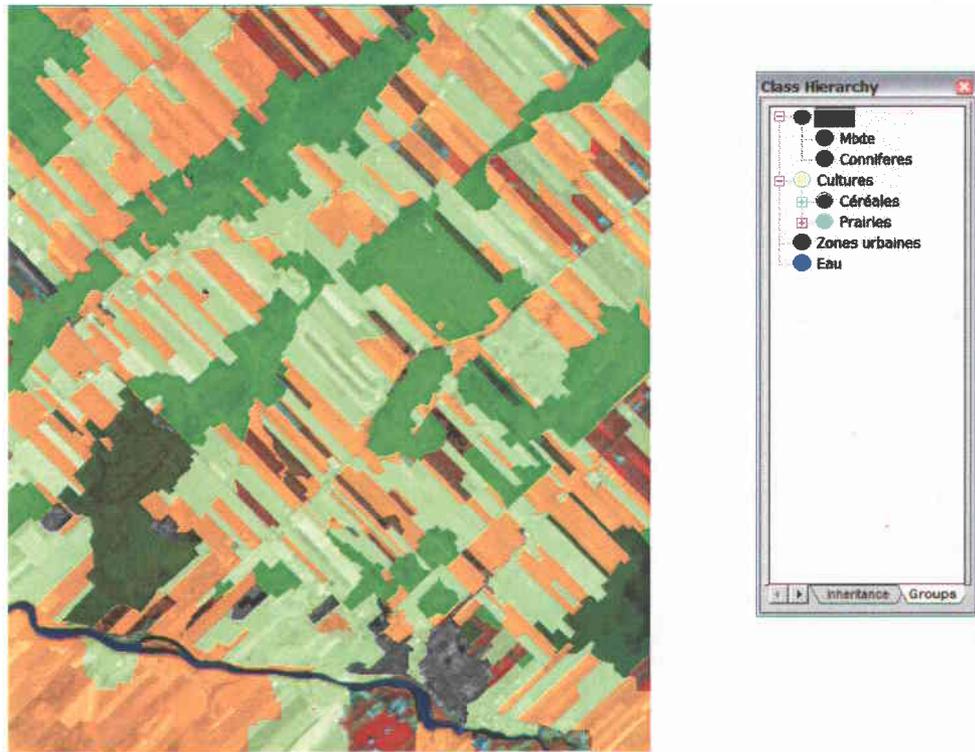


Figure 5.3 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 2 classes de cultures

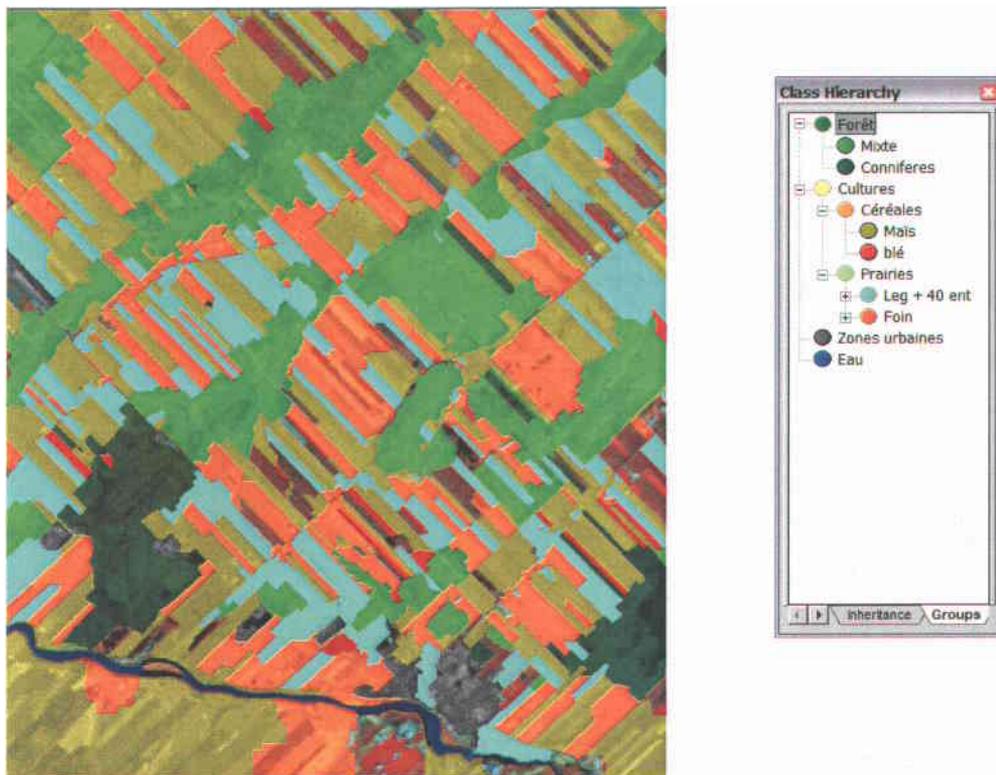


Figure 5.4 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 4 classes de cultures

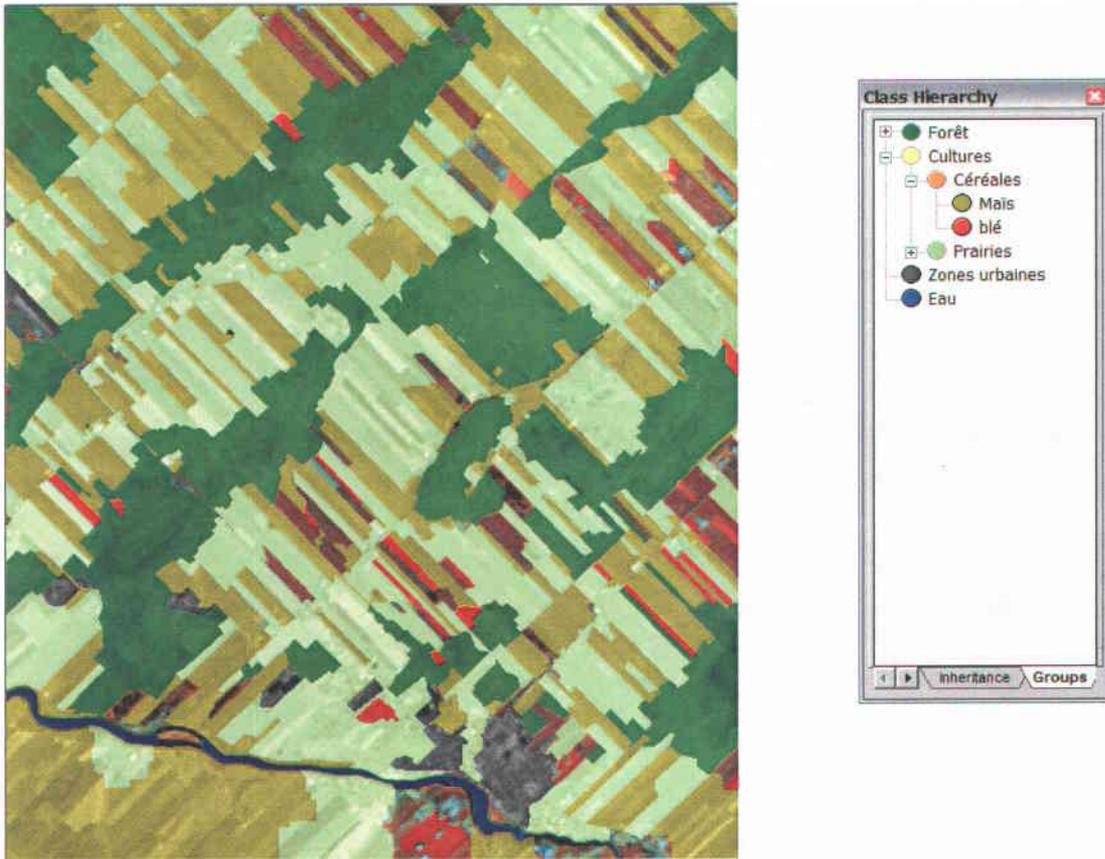


Figure 5.5 : Classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 pour le modèle AnnAGNPS (Classification AnnAGNPS)

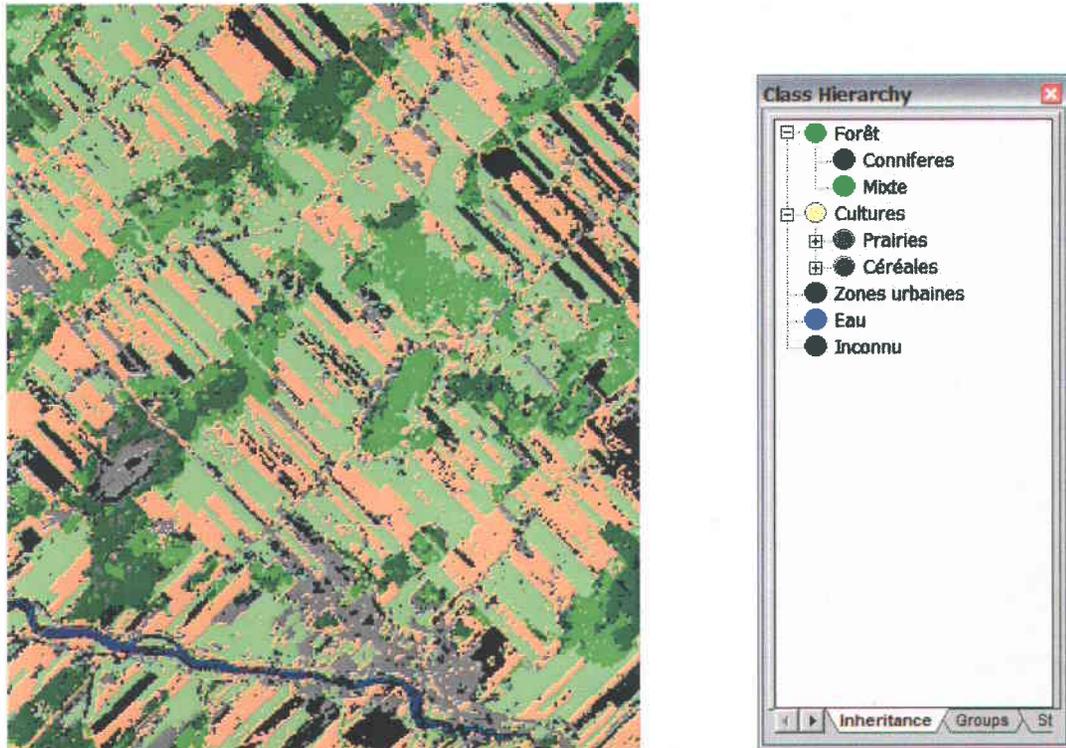


Figure 5.6 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 2 classes de cultures

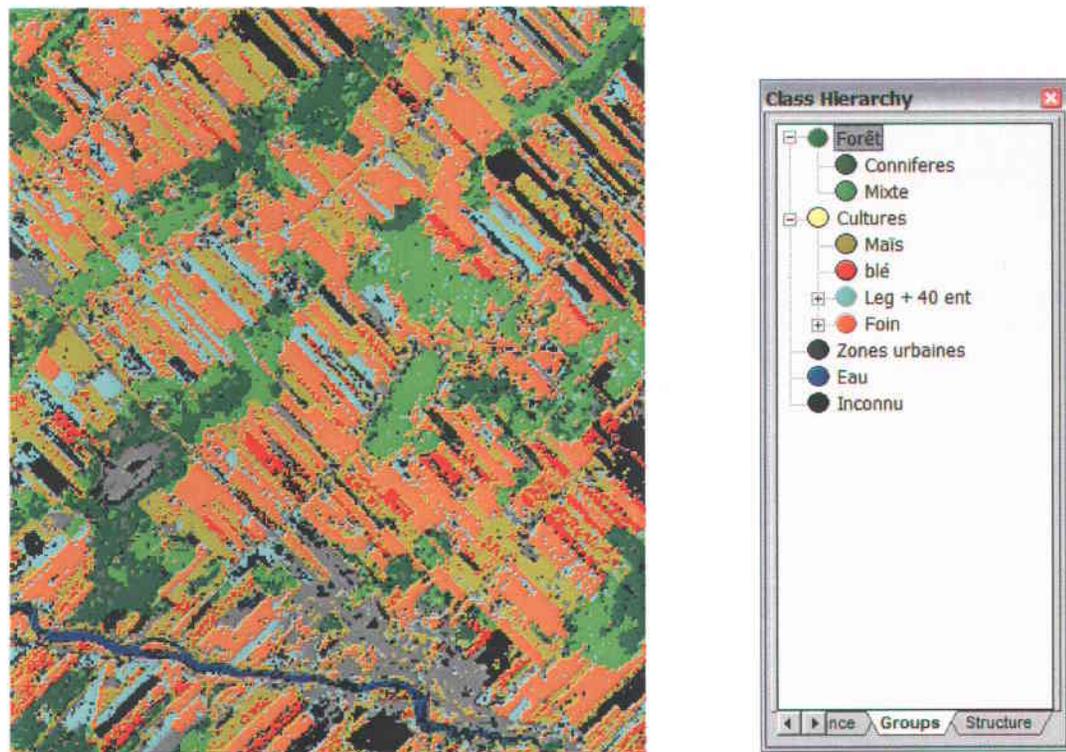


Figure 5.7 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999 avec 4 classes de cultures

Tableau 5.1 : Statistiques qualitatives des classifications de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

Méthode de classification	Indice de qualité	2 classes de cultures	4 classes de cultures	Classes AnnaGNPS
Floue par objet	Précision moyenne (%)	88	81	88
	Indice Kappa (%)	84	77	83
	Pixels non classés (%)	8		
Maximum de vraisemblance	Précision moyenne (%)	74	62	n.d.
	Indice Kappa (%)	61	51	n.d.
	Pixels non classés (%)	12	12	n.d.

Tableau 5.2 : Matrice de confusion de la classification floue par objet AnnAGNPS de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

	Forêt	Blé	Zones urbaines	Maïs	Eau	Prairies	Somme
Forêt	28 925	513	0	0	0	0	29 438
Blé	0	609	0	71	0	309	989
Zones urbaines	0	0	3027	1	0	0	3028
Maïs	7	0	0	15 493	0	4177	19 677
Eau	0	0	0	0	1201	0	1201
Prairies	6	0	0	3859	0	20 992	24 857
Non-classés	7	1	0	52	0	451	511
Somme	28 945	1123	3027	19 476	1201	25 929	

Tableau 5.3 : Erreurs d'omission et de commission de la classification floue par objet AnnAGNPS de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

	Forêt	Blé	Zones urbaines	Maïs	Eau	Prairies
Erreur de commission (%)	1,7	38,4	0	21,3	0	15,5
Erreur d'omission (%)	0,1	45,8	0	20,5	0	19

Les figures 5.1 et 5.2 illustrent les deux niveaux de segmentation qui sont appliqués à l'image ETM+. Sur la figure 5.2, les objets « Forêt » sont regroupés afin de former des

zones homogènes. Il est possible de constater l'impact de l'utilisation du fichier vectoriel (figure 4.2) sur les segmentations en examinant sur ces deux figures les objets créés au sud de la rivière Etchemin (en noir sur les figures). Le canevas parcellaire étant inexistant à cet endroit dans le fichier vectoriel, on remarque que les objets sont générés uniquement en fonction des paramètres de segmentation fixés (tableau 4.8).

Les figures 5.3, 5.4 et 5.5 présentent les résultats des classifications floues par objet selon les différentes définitions de classes thématiques. Les données qui alimenteront le modèle AnnAGNPS proviennent de la classification floue par objet avec la définition de classes « Classification AnnAGNPS » (figure 5.5). Cette figure révèle une présence importante de prairies. En ce qui a trait aux céréales, les cultures de maïs dominent le paysage comparées aux cultures de blé qui occupent une très faible partie du territoire. Les objets de couleurs différentes à la palette associée aux classes thématiques sont des zones dont l'occupation du sol n'est pas identifiée.

Les figures 5.6 et 5.7 sont les résultats des classifications par maximum de vraisemblance de l'image Landsat-7 ETM+ en fonction des deux définitions de classes. De façon évidente, il est possible d'affirmer que les classifications par maximum de vraisemblance offrent un produit final très différent des classifications floues par objet. Sur les figures 5.6 et 5.7, de nombreux pixels isolés ou petits groupes de pixels sont observés à l'intérieur d'une même parcelle. De plus, de nombreux pixels semblent classés inadéquatement comme en témoigne la zone urbaine identifiée par le classificateur qui est entourée de forêt dans le cadran sud-ouest sur les deux figures. Il y a aussi plusieurs pixels associés à la classe « inconnu » (en noir sur les figures). Néanmoins, les zones de forêts et les zones urbaines sont identifiées de façon plus locale et apparaissent comme plus fidèles à la réalité lorsqu'elles sont comparées aux objets identifiés par la méthode floue par objet.

Le tableau 5.1 contient l'ensemble des statistiques qualitatives calculées pour les méthodes de classifications employées avec l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999. De nombreux constats peuvent être émis suite à l'étude de ce tableau. Tout d'abord, de façon générale, la méthode de classification floue par objet produit de meilleurs résultats que la méthode de maximum de vraisemblance pour chacun des indices de

qualités et pour toutes les définitions de classes. Ainsi, les précisions moyennes sont nettement supérieures pour les classifications floues par objet et la même observation s'applique pour l'indice Kappa. Selon les statistiques, les pixels non classés occupent une plus grande superficie sur les images classifiées par la méthode du maximum de vraisemblance. Ensuite, les classifications avec la définition « 2 classes de cultures » exhibent de meilleurs résultats qualitatifs que la définition « 4 classes de cultures » et ce indépendamment des méthodes employées. Cette constatation est aisément explicable. La définition « 4 classes de cultures » contient des cultures qui possèdent des caractéristiques spectrales similaires tandis que la définition « 2 classes de cultures » regroupe certaines cultures pour former des thématiques plus générales et cela suppose donc une meilleure discrimination entre elles (voir 4.1.3.1). Enfin, pour la méthode de classification floue par objet, la « Classification AnnAGNPS » produit des résultats statistiques de qualité supérieure à la classification avec 4 classes de cultures et comparables à celle avec 2 classes de cultures.

La matrice de confusion de la classification floue par objet « Classification AnnAGNPS » constitue le tableau 5.2 et le tableau 5.3 contient les erreurs d'omission et de commission de cette classification. Ces tableaux indiquent que les classes « Forêt », « Zones urbaines » et « Eau » correspondent de façon très juste aux données de validation. Les classes « Prairies » et « Maïs » sont relativement bien identifiées malgré la présence d'une certaine confusion entre ces deux classes. Par contre, la classe « Blé » affiche un nombre élevé de pixels mal classés en terme de pourcentage. Ceux-ci sont assignés à tort en forte proportion à la classe « Prairies ».

### 5.1.1.2 Image ASTER du 23 juin 2000

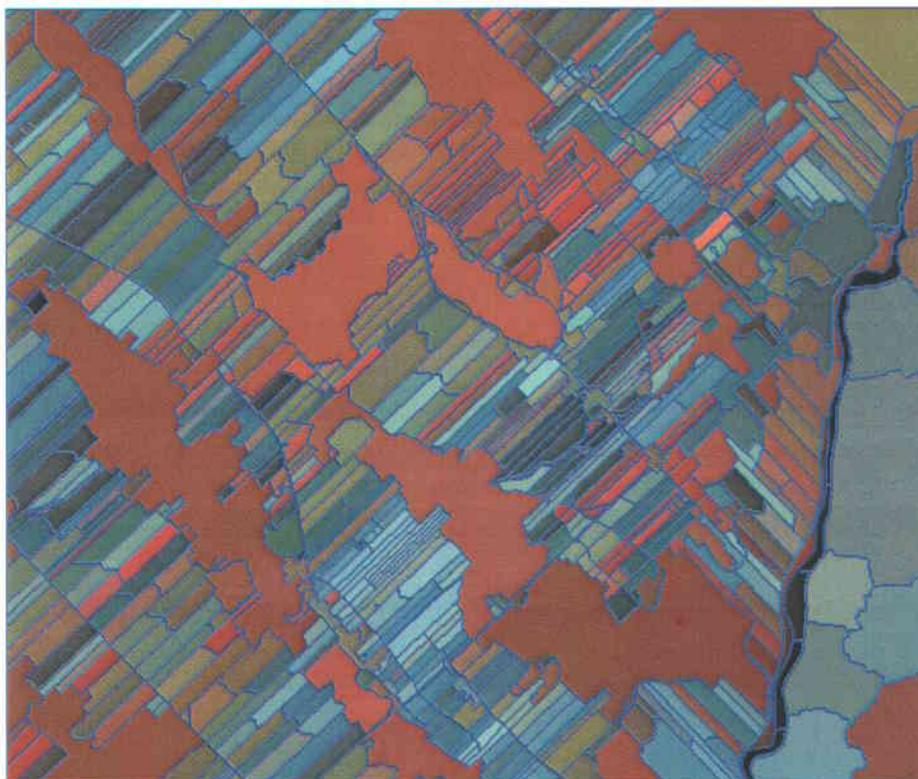


Figure 5.9 : Fusion des zones forestières de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 3, 4 et 6)

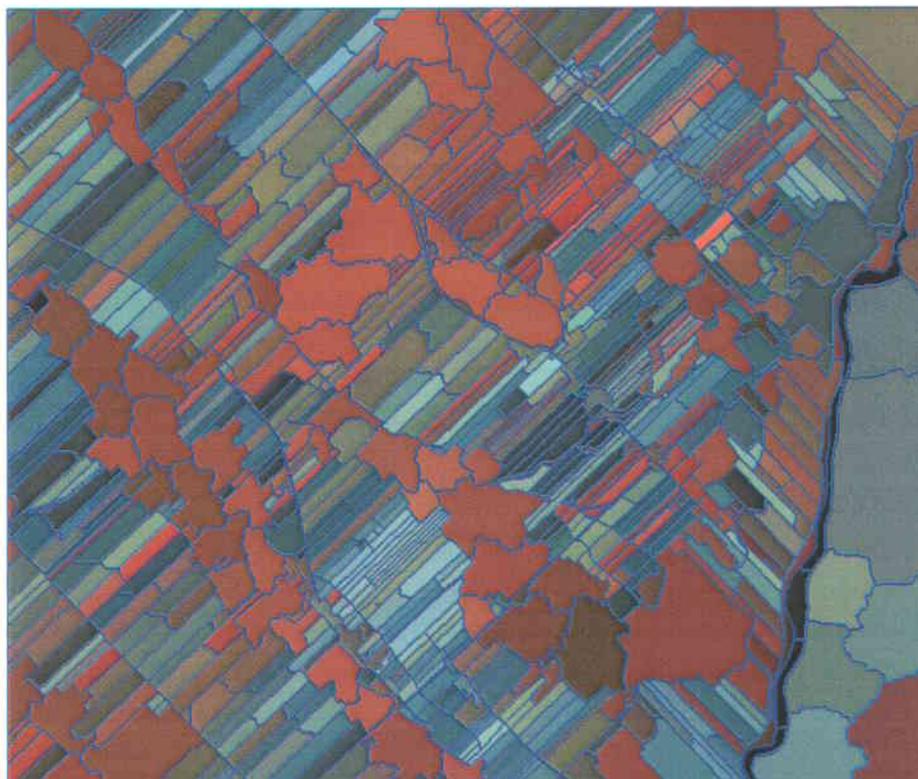


Figure 5.8 : Segmentation de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec eCognition (combinaison couleur des bandes 3, 4 et 6)

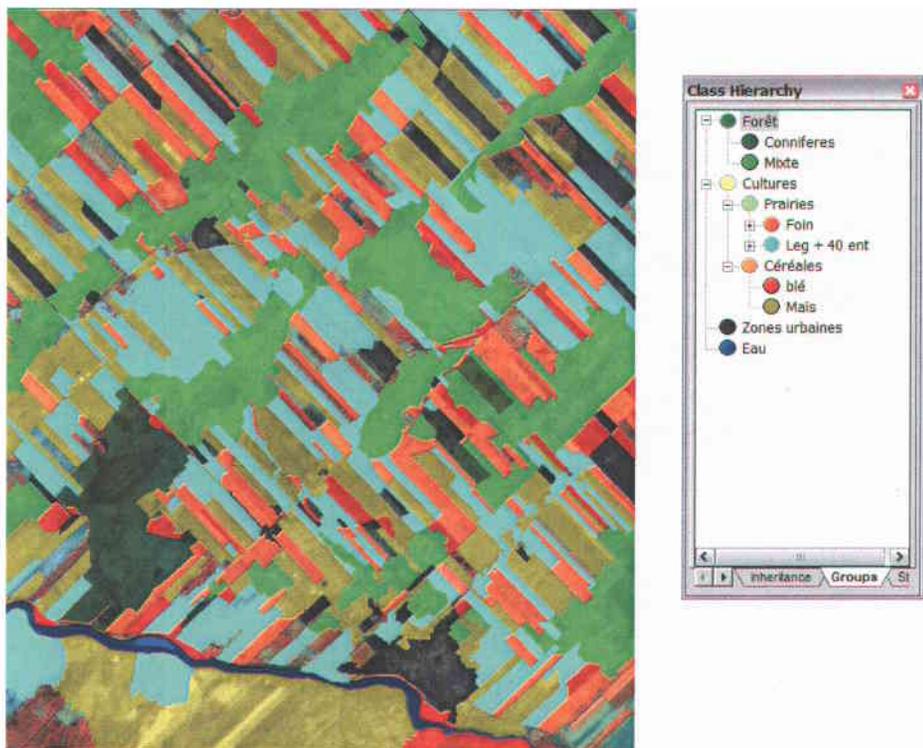
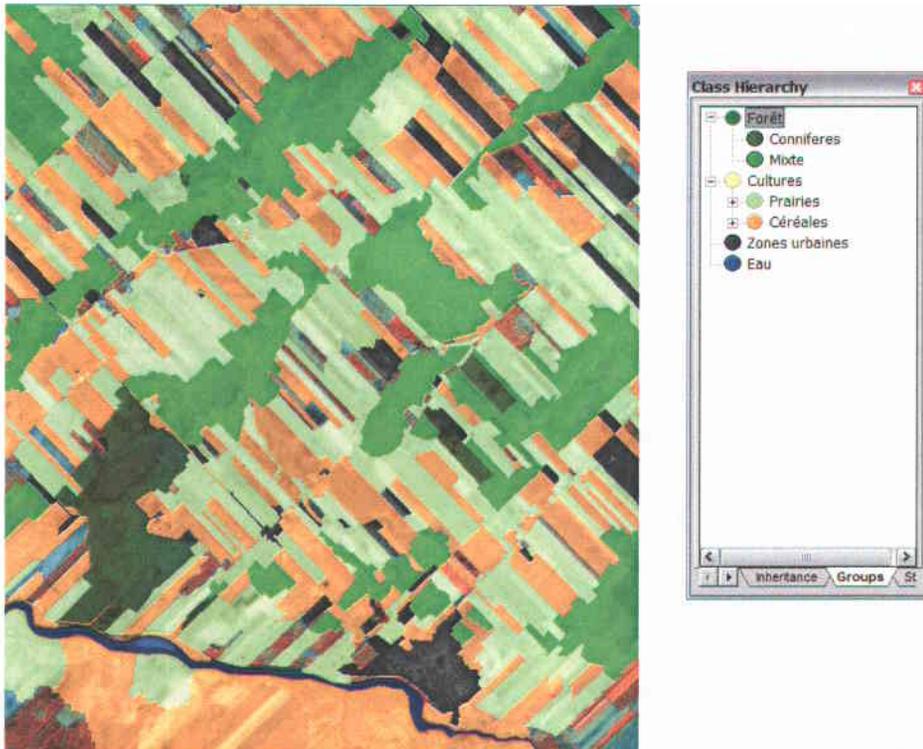




Figure 5.12 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 2 classes de cultures

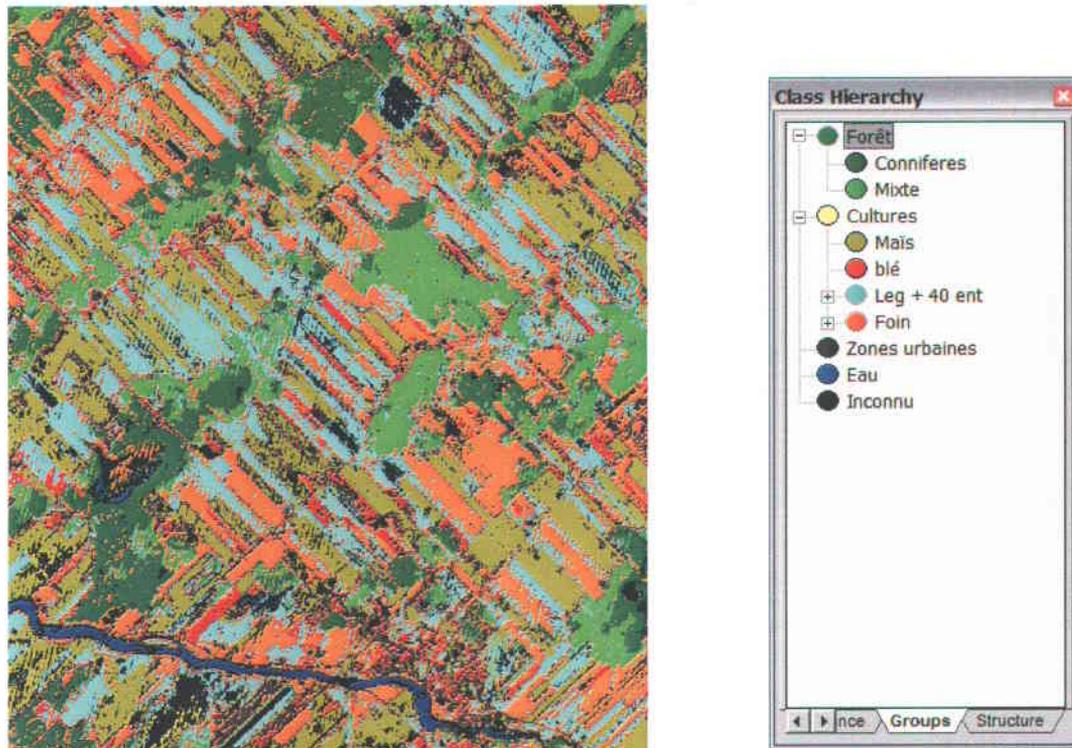


Figure 5.13 : Classification par maximum de vraisemblance de l'image ASTER du 23 juin 2000 avec 4 classes de cultures

Tableau 5.4 : Statistiques qualitatives des classifications de l'image ASTER du 23 juin 2000

Méthode de classification	Indice de qualité	2 classes de cultures	4 classes de cultures
Floue par objet	Précision moyenne (%)	89	78
	Indice Kappa (%)	85	73
	Pixels non classés (%)	10	
Maximum de vraisemblance	Précision moyenne (%)	78	66
	Indice Kappa (%)	68	57
	Pixels non classés (%)	17	17

Les figures 5.8 et 5.9 exposent les deux niveaux de segmentation appliqués à l'image ASTER. De la même façon que pour l'image ETM+, les zones forestières sont regroupées pour former des zones homogènes sur la figure 5.9. Le même constat avancé lors de l'analyse des figures 5.2 et 5.3 peut être apporté ici concernant les objets au sud de la rivière Etchemin. Ceux-ci sont créés exclusivement suite à l'application des paramètres de segmentation.

Les figures 5.10 et 5.11 illustrent les résultats des classifications floues par objet pour les deux définitions de classes thématiques. Lorsque comparés à leurs contreparties ETM+ (figures 5.3 et 5.4) ces résultats présentent une particularité frappante. En effet, il semble avoir sur ces deux images un nombre plus élevé d'objets classés « Inconnu » que pour les classifications de l'image Landsat-7 ETM+. Évidemment, il est difficilement justifiable de comparer directement les résultats de classification d'images de deux capteurs distincts et provenant de scènes prises à des dates différentes. D'ailleurs, le fait que la prise de vue ASTER couvre le bassin tôt dans la saison végétative est peut-être la raison qui explique cette particularité : le processus de classification des cultures étant complexifié par le faible développement des plantes.

Les résultats des classifications par maximum de vraisemblance de l'image ASTER sont présentés aux figures 5.12 et 5.13. Tout comme pour l'image ETM+, ces résultats s'avèrent différents visuellement de ceux obtenus par la méthode floue par objet. La

présence d'un effet de lignage affectant les images classifiées par maximum de vraisemblance constitue un élément qui distingue ces classifications par rapport à l'autre méthode et par rapport à celles du capteur ETM+. Cet artifice est possiblement causé par la bande 6 du capteur ASTER.

Le tableau 5.4 résume les statistiques qui servent à évaluer la qualité des classifications de l'image ASTER. L'analyse des indices de qualité révèle que la méthode de classification floue par objet offre de meilleurs résultats qualitatifs que la méthode du maximum de vraisemblance en plus de classifier une plus grande proportion de pixels dans l'image. De plus, peu importe la technique utilisée, les classifications employant la définition « 2 classes de cultures » présentent des résultats se rapprochant davantage de la réalité que ceux obtenus avec la définition « 4 classes de cultures ». L'explication suggérée lors de l'analyse de qualité des classifications de l'image ETM+ semble s'appliquer dans le cas présent aussi (voir 5.1.1.1).

### **5.1.2 Résultats de la comparaison des images ASTER et Landsat-7 ETM+**

Les résultats qui servent à l'analyse comparative entre l'image ASTER du 19 juillet 2001 et l'image Landsat-7 ETM+ de la même date, sont présentés sous forme graphique. Les deux premiers portent sur les valeurs minimum, maximum et moyenne de réflectance. Le troisième rend compte des valeurs d'écart type des réflectances moyennes tandis que les suivants représentent les histogrammes des fréquences des réflectances de toutes les bandes pour chaque capteur. Sur ces derniers, il est important de remarquer que les échelles en abscisse diffèrent parfois d'une bande à l'autre et selon le capteur. Il faut donc être prudent lors de l'interprétation visuelle de ces résultats. Finalement, le graphique des profils linéaires de réflectances des deux capteurs pour la ligne 207 est présenté.

## 5.1.2.1 Résultats moyens de la comparaison entre capteurs

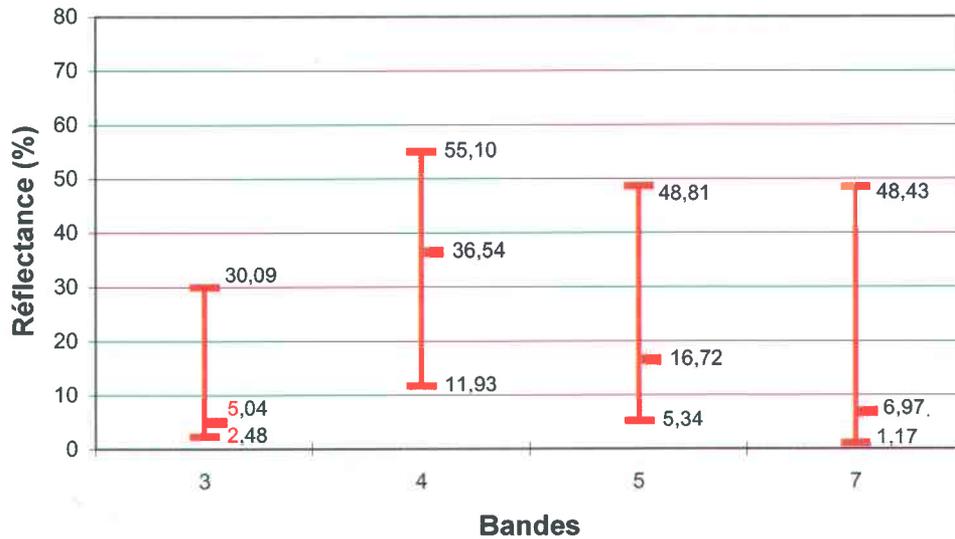


Figure 5.14 : Intervalles de valeurs des réflectances et valeurs moyennes pour les bandes de l'image du 19 juillet 2001 prise par le capteur Landsat-7 ETM+

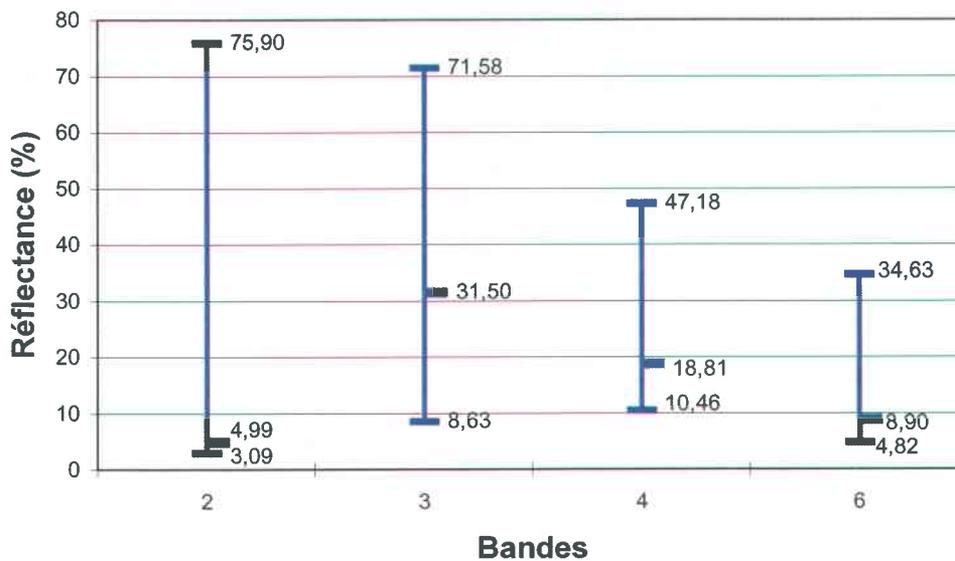


Figure 5.15 : Intervalles de valeurs des réflectances et valeurs moyennes pour les bandes de l'image du 19 juillet 2001 prise par le capteur ASTER

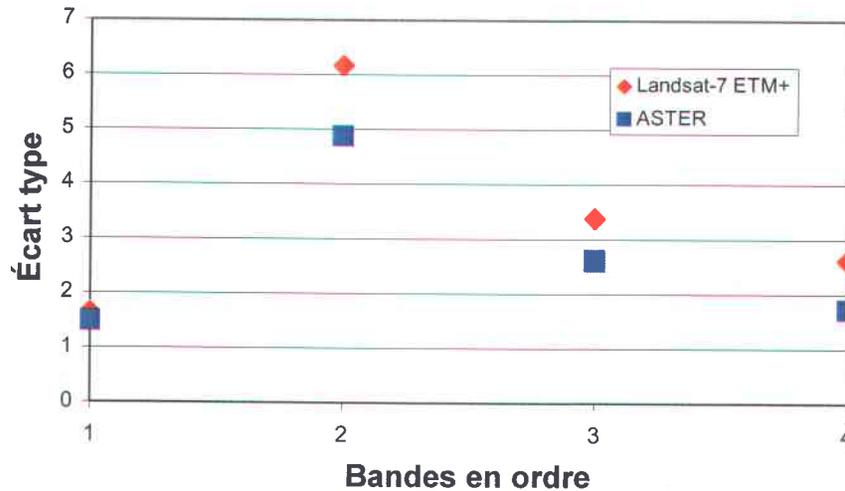


Figure 5.16 : Écart type des moyennes des réflectances pour les bandes des images du 19 juillet 2001 prises par les capteurs Landsat-7 ETM+ et ASTER

Les figures 5.14 et 5.15 montrent les intervalles de valeurs des réflectances et les valeurs moyennes pour chaque bande des images prises le 19 juillet 2001 par le capteur Landsat-7 ETM+ et le capteur ASTER. Malgré la différence de capteur, les dynamiques des deux figures sont relativement semblables à l'exception des valeurs de maximum. Ainsi, les moyennes de chaque bande sont similaires pour les deux capteurs. Les bandes infrarouges (ETM+ : 4 et ASTER : 3) affichent les moyennes de réflectance les plus élevées. Une distinction est observée en ce qui concerne les intervalles de valeurs où les bandes du capteur ETM+ présentent des intervalles de dimension analogue entre elles comparées à ceux du capteur ASTER.

On retrouve à la figure 5.16, les écarts types des moyennes des réflectances pour chaque bande des images du 19 juillet 2001 acquises par ETM+ et ASTER. Comme pour les figures précédentes, les dynamiques générales des valeurs pour chacune des bandes sont très similaires pour les deux capteurs. Cependant, les écarts types des moyennes d'ETM+ sont pour toutes les bandes plus élevés que ceux d'ASTER. Cette observation est étonnante compte tenu du fait que les intervalles de valeurs pour les bandes 2 et 3 de ce dernier sont nettement plus étendus que ceux du capteur ETM+ (figures 5.14 et 5.15). L'allure de la figure 5.15 est probablement déformée par des valeurs extrêmes isolées qui n'ont pas beaucoup d'effet sur l'écart type de la moyenne ce qui expliquerait la différence des maximums mentionnée au paragraphe précédent.

### 5.1.2.2 Résultats par bande de la comparaison entre les capteurs

Histogrammes des fréquences des réflectances de l'image ASTER du 19 juillet 2001

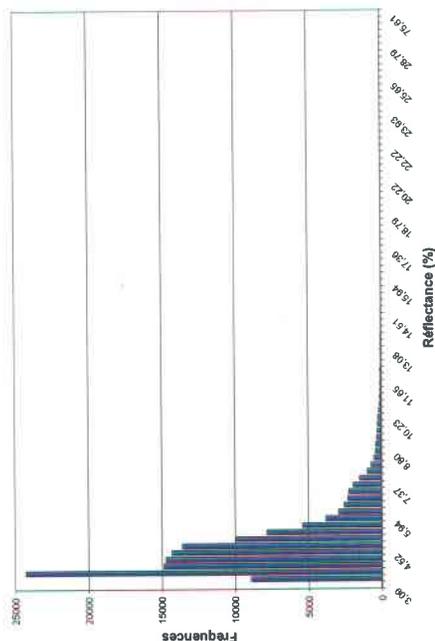


Figure 5.18 : bande 2

Histogrammes des fréquences des réflectances de l'image Landsat-7 ETM+ du 19 juillet 2001

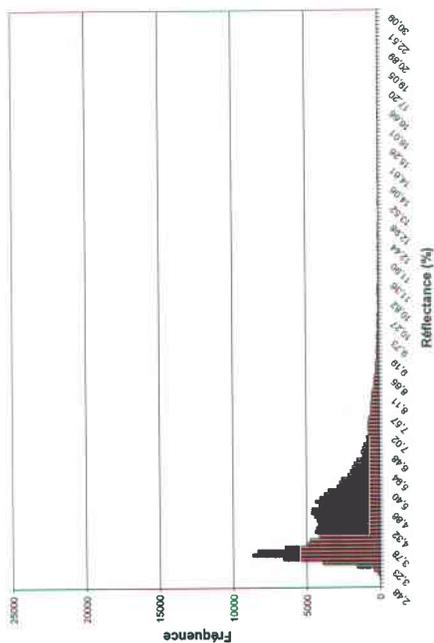


Figure 5.17 : bande 3

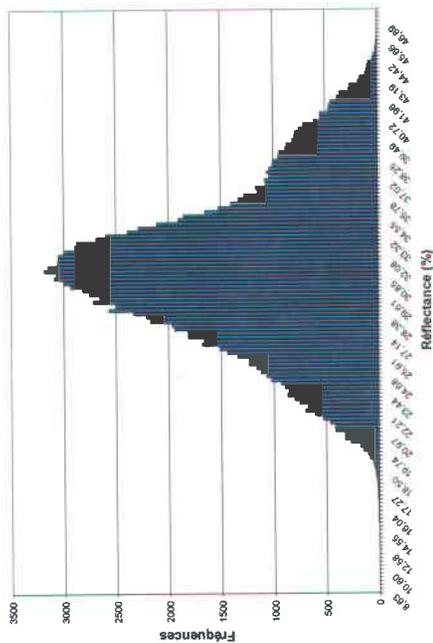


Figure 5.20 : bande 3

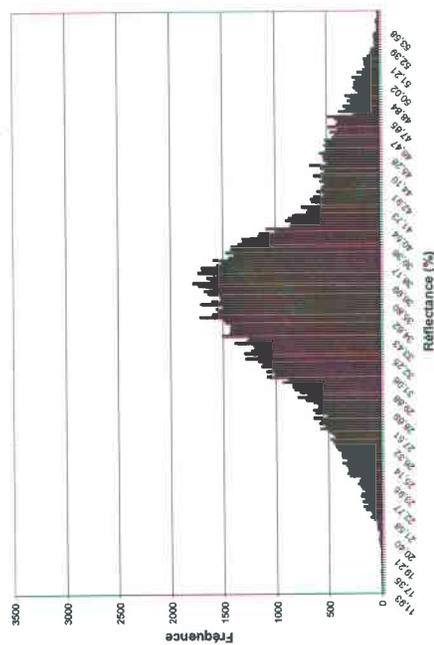


Figure 5.19 : bande 4

Histogrammes des fréquences des réflectances de l'image Landsat-7 ETM+ du 19 juillet 2001

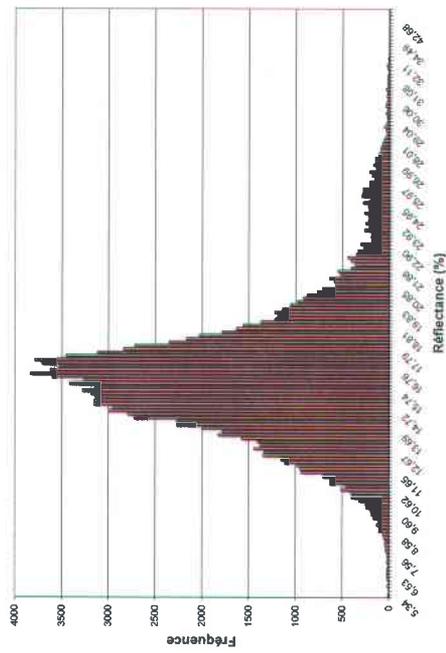


Figure 5.21 : bande 5

Histogrammes des fréquences des réflectances de l'image ASTER du 19 juillet 2001

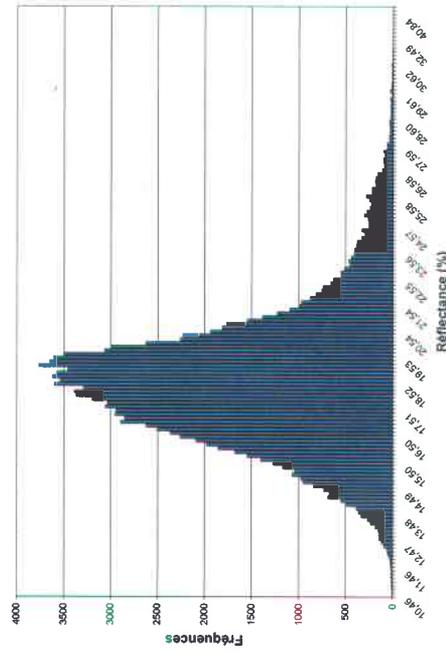


Figure 5.22 : bande 4

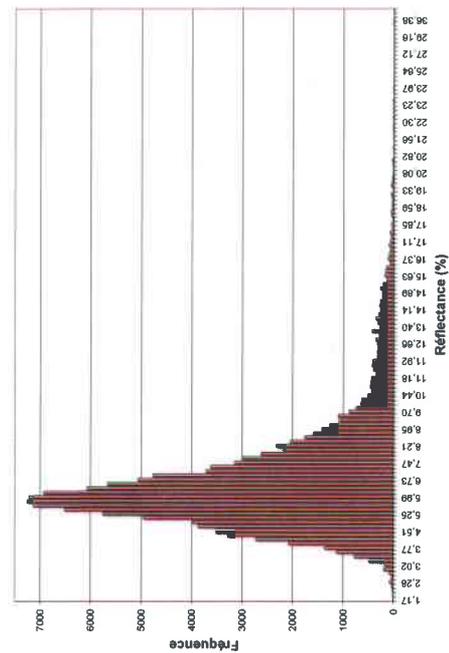


Figure 5.23 : bande 7

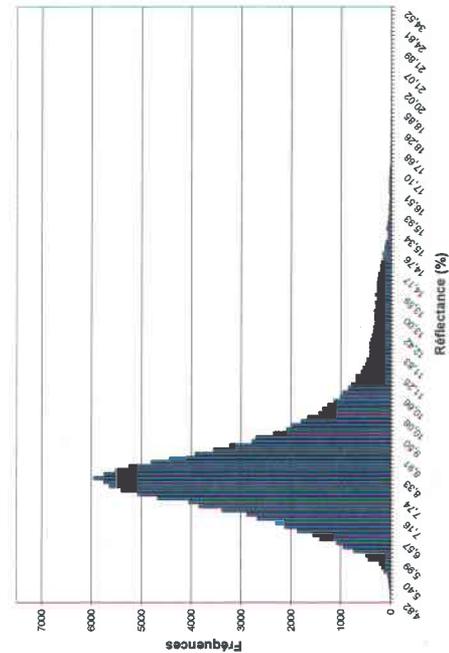


Figure 5.24 : bande 6

Les figures 5.17 à 5.24 exposent les histogrammes des fréquences des réflectances de chaque bande des images du 19 juillet 2001 prises par les deux capteurs (ETM+ en rouge et ASTER en bleu). Les formes des histogrammes de l'image ETM+ et de l'image ASTER sont comparables particulièrement pour les trois dernières paires de figures (5.19/5.20, 5.21/5.22, 5.23/5.24).

### 5.1.2.3 Résultats comparatifs des profils linéaires de chaque capteur

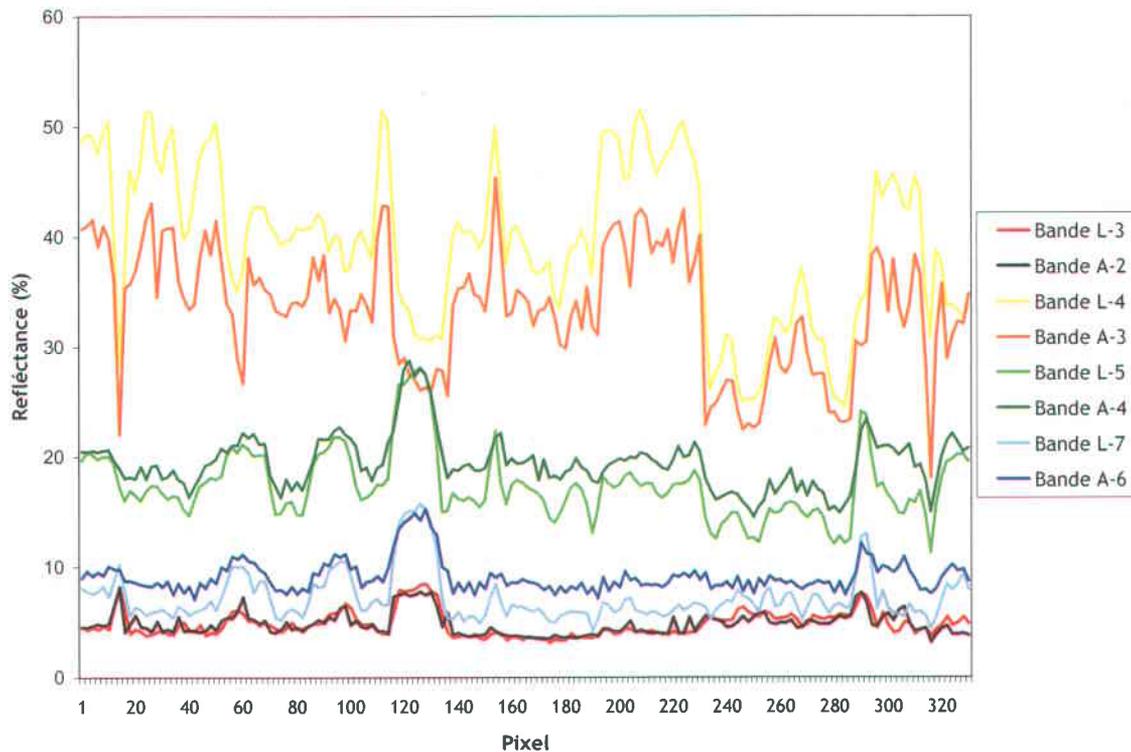


Figure 5.25 : Profil des réflectances des pixels de la ligne 207 pour les deux capteurs (L : Landsat-7 EMT+, A : ASTER)

Il est possible d'observer sur la figure 5.25 la bonne correspondance qui existe entre les deux capteurs au niveau des valeurs des réflectances sur une ligne commune. Cette figure résulte de la création d'un profil des réflectances pour chaque bande sur la ligne 207 de l'image ETM+ et de l'image ASTER du 19 juillet 2001.

### 5.1.3 Résultats du transfert des données de classifications vers le modèle AnnAGNPS

Les différents résultats contenus dans cette section font suite aux nombreuses étapes réalisées lors du processus de transfert des données de classification vers AnnAGNPS. La présentation de ceux-ci respecte l'ordre établi par la méthodologie exposée dans les sections 4.2.1 à 4.2.4.

#### 5.1.3.1 Fichiers parcellaires et cellulaires résultants du croisement des données

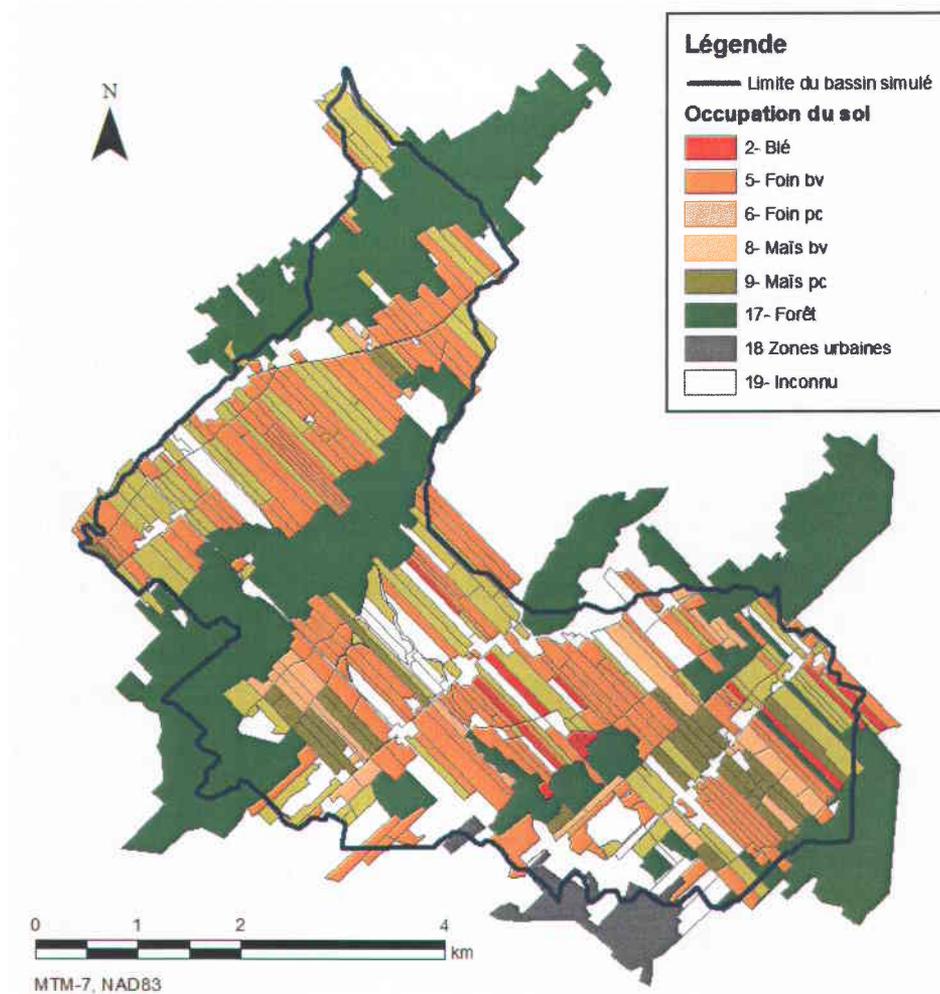


Figure 5.26 : Carte parcellaire suite à l'étape de croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales

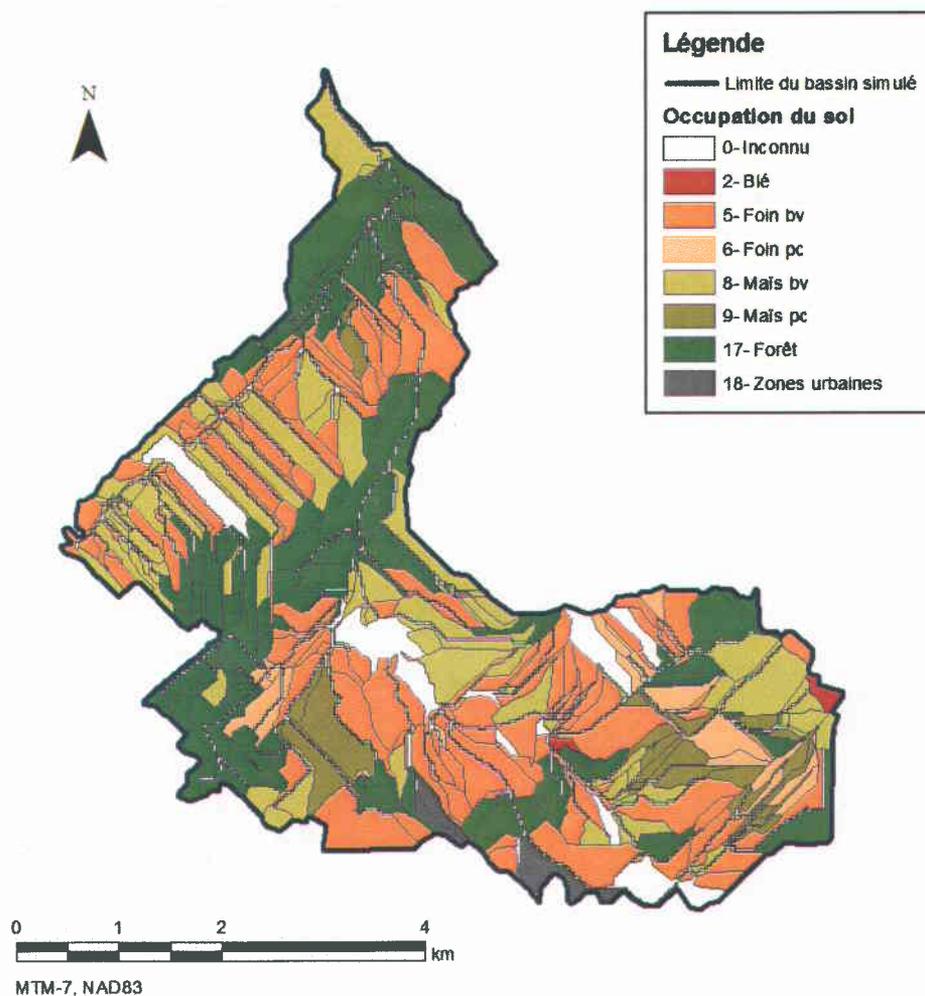


Figure 5.27 : Carte cellulaire suite à l'étape de croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales

Les figures 5.26 et 5.27 illustrent bien les disparités qui existent entre le format de données parcellaire et le format de données cellulaire. Le premier provient de la classification floue par objet et évoque les limites de lots tandis que le second représente les cellules AnnAGNPS créées par le module Topaz en fonction du régime hydrologique et des paramètres fixés lors de travaux antérieurs à l'INRS-ETE.

### 5.1.3.2 Comparaison de l'occupation du sol obtenue par télédétection et enquête terrain

Les trois figures de la page suivante montrent la différence d'occupation qui existe entre les données cellulaires qui proviennent des enquêtes terrain selon la codification originale AGNPS et les données cellulaires obtenues par télédétection.

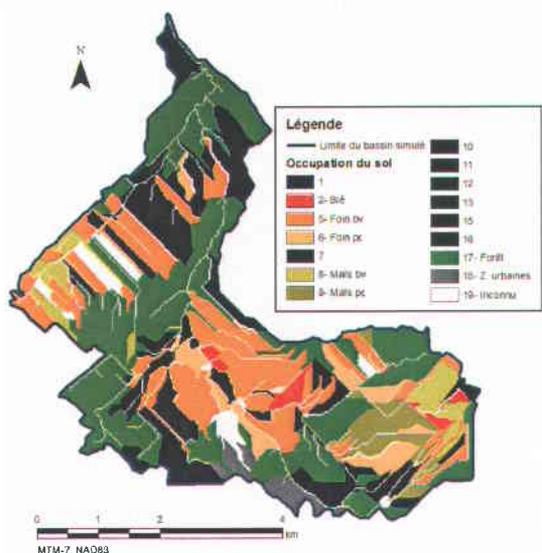


Figure 5.28 : Carte cellulaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain avec tous les codes de gestion AGNPS

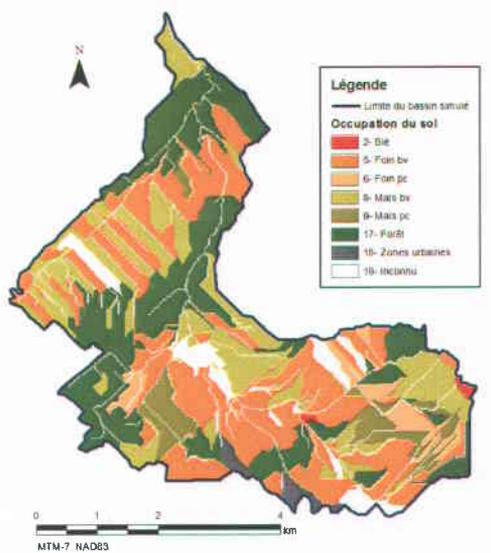


Figure 5.29 : Carte cellulaire des occupations du sol dérivées de la télédétection

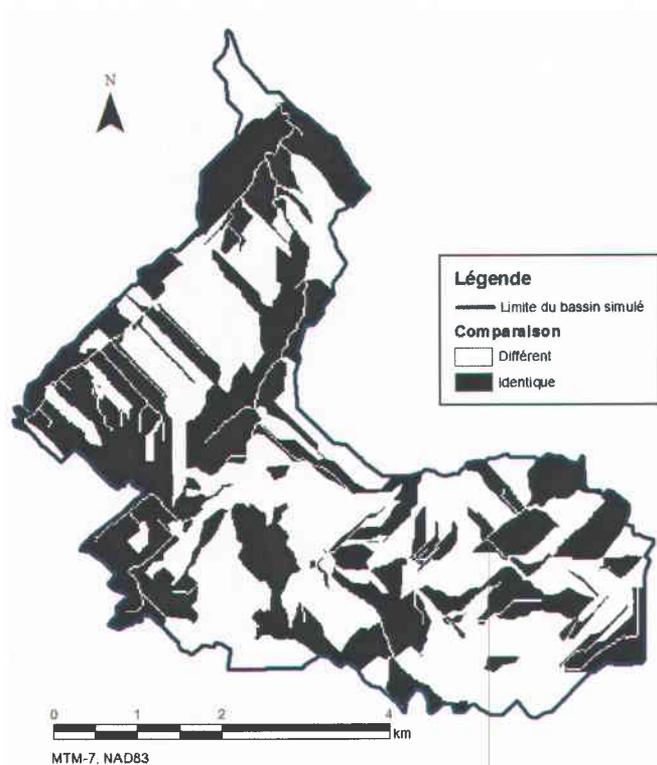


Figure 5.30 : Carte comparative des occupations du sol au niveau cellulaire avec les données obtenues par enquêtes terrain et les données de télédétection

Tableau 5.5 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.30

	Pixels classés en pourcentage
Différent	50
Identique	50

À l'observation des figures précédentes, il est évident que la comparaison des cartes cellulaires 5.29 et 5.30 est en partie faussée par la différence qui existe entre les définitions de classes thématiques des deux sources de données. En effet, la carte de la figure 5.29 affiche huit classes thématiques de plus que celle de la figure 5.30. Les statistiques comparatives des deux cartes témoignent de la faible correspondance entre celles-ci : les pixels classés « Identique » occupent seulement 50 % du territoire. Parmi ce 50 %, une évaluation visuelle rapide permet de constater qu'une forte proportion de ces pixels identiques est associée à la classe forêt. Les zones de cultures sont quant à elles peu similaires.

Afin d'éliminer le biais introduit par la disparité des définitions de classes thématiques entre les deux cartes, une reclassification des codes de gestion est accomplie. Cette reclassification permet d'uniformiser la codification entre les cartes. Les résultats de ce processus sont présentés à la page suivante.

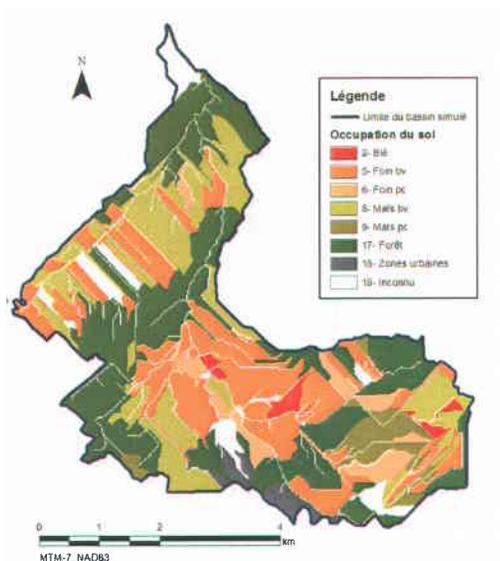


Figure 5.31 : Carte cellulaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain suite à la reclassification des codes de gestion AGNPS

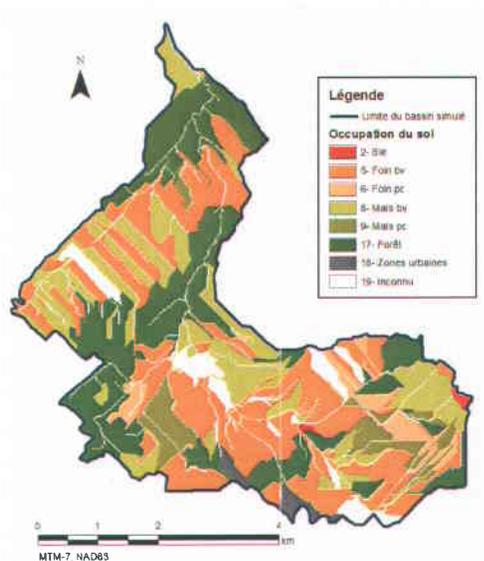


Figure 5.32 : Carte cellulaire des occupations du sol dérivées de la télédétection

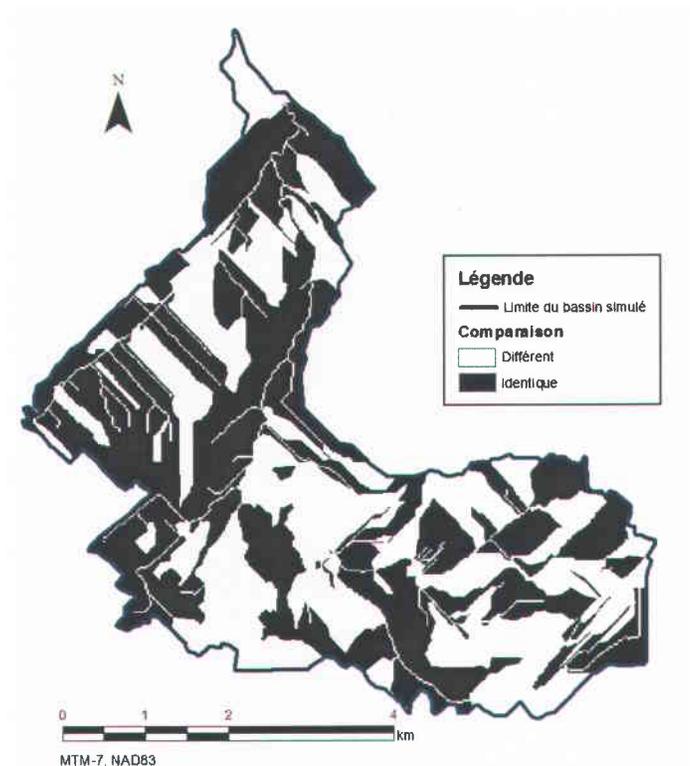


Figure 5.33 : Carte comparative des occupations du sol au niveau cellulaire avec les données obtenues par enquêtes terrain reclassifiées et les données de télédétection

Tableau 5.6 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.33

	Pixels classés en pourcentage
Différent	42
Identique	58

La comparaison des cartes d'occupations classifiées selon les mêmes codes de gestion AGNPS révèle une légère augmentation de la concordance entre les données des enquêtes terrain et les données de télédétection par rapport à la première comparaison (p. 85). Ainsi, les pixels identiques entre les deux cartes cellulaires suite à la reclassification se chiffrent à 58 % de l'ensemble du territoire, soit 8 % de plus que la comparaison initiale. Cet accroissement est directement imputable aux zones de cultures, la reclassification n'affectant pas les objets de la classe « Forêt » et de la classe « Zones urbaines ».

Malgré une précision accrue, la proportion de pixels similaires entre les données cellulaires des deux sources est très faible compte tenu du fait que la précision moyenne de la classification « Classification AnnAGNPS » dépasse les 88 %. Les cartes cellulaires prenant leur origine des cartes parcellaires, la comparaison de ces dernières permet de mieux quantifier la précision perdue lors de la transformation des parcelles en cellules. Les résultats de cette comparaison sont illustrés à la page suivante.

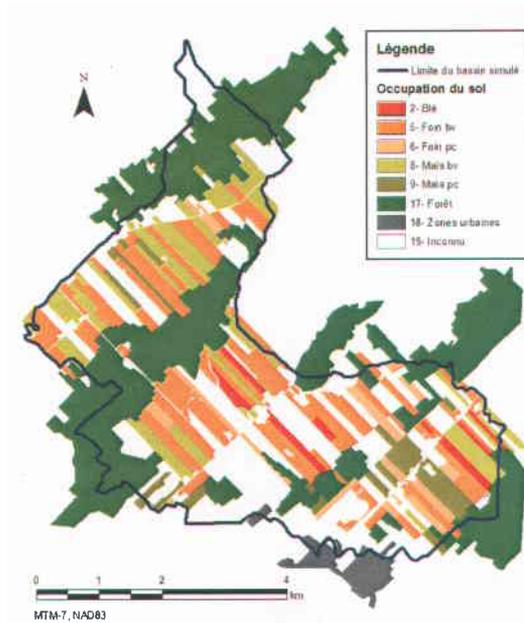


Figure 5.34 : Carte parcellaire des occupations du sol obtenues par enquêtes terrain suite à la reclassification des codes de gestion AGNPS

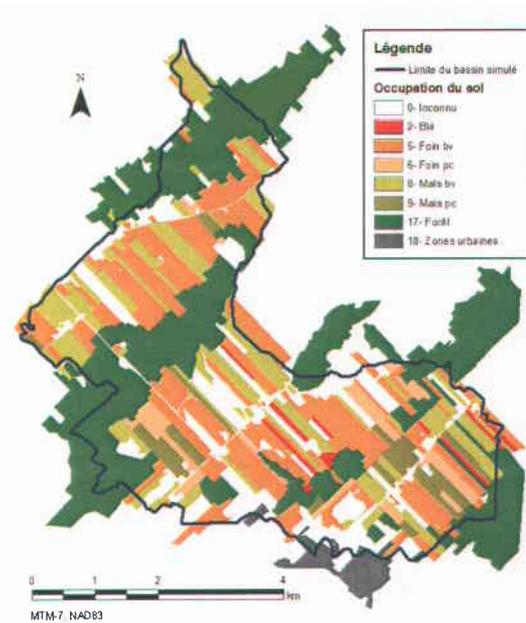


Figure 5.35 : Carte parcellaire des occupations du sol dérivées de la télédétection

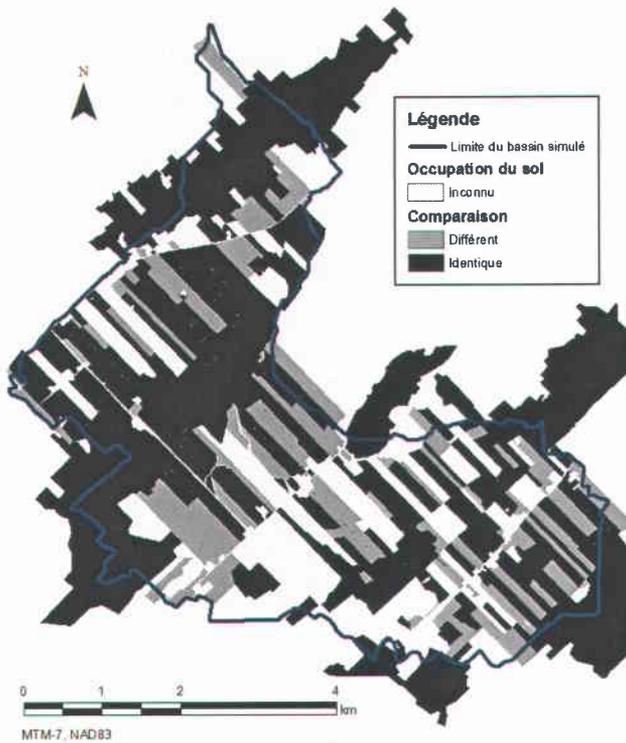


Figure 5.36 : Carte comparative des occupations du sol au niveau parcellaire avec les données obtenues par enquêtes terrain et les données de télédétection

Tableau 5.7 : Résultats statistiques de la comparaison illustrée à la figure 5.36

	Pixels classés en pourcentage
Différent	20
Identique	80

### 5.1.4 Résultats des simulations AnnAGNPS

Avant de présenter les résultats de simulation AnnAGNPS, une précision s'impose. En effet, il est important de comprendre que la présente recherche n'est aucunement orientée vers une interprétation des sorties des simulations AnnAGNPS au point vue environnemental (pour ce type d'analyse, voir Henry, 2004). Cependant, certains de ces résultats sont intéressants car ils peuvent aider à vérifier les différentes hypothèses avancées dans le cadre du projet. Ainsi, les résultats des simulations AnnAGNPS avec les données des enquêtes de terrain et les données de télédétection exposées dans la présente section ont pour but de faciliter l'analyse ou de simplement illustrer un exemple du format des résultats. Les résultats non exhibés ici se retrouvent à l'annexe X. Les sorties totales mensuelles à l'exutoire sont tout d'abord mises en perspective sous forme d'histogramme. Par la suite, les résultats de qualité et de quantité d'eau dans les tronçons sont cartographiés. Enfin, les cartes de la contribution des cellules sont présentées.

### 5.1.4.1 Sorties totales mensuelles à l'exutoire

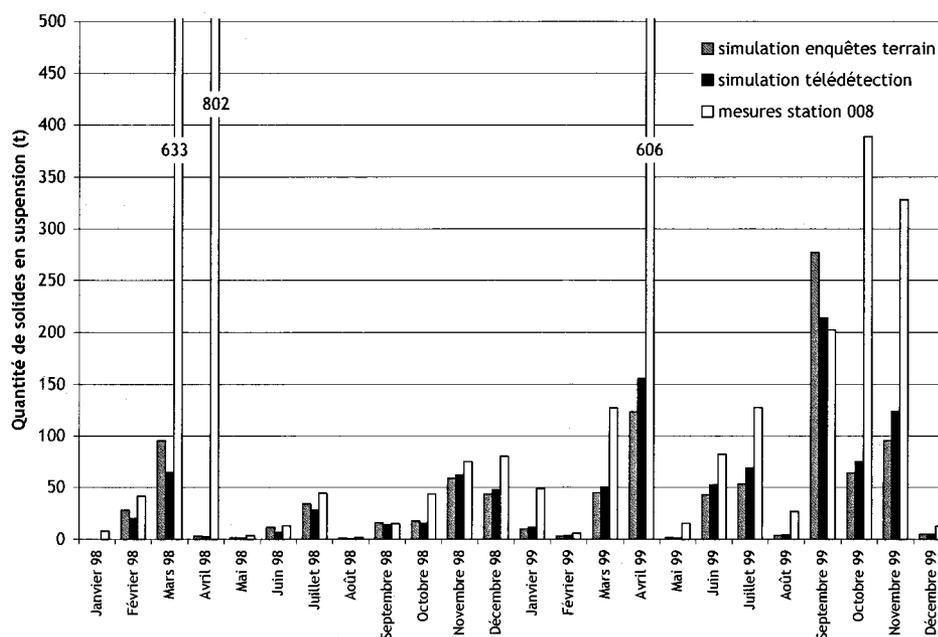


Figure 5.37 : Quantité de sédiments en suspension à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord

La figure 5.37 s'avère particulièrement intéressante à analyser pour évaluer l'impact de l'utilisation des données de télédétection sur les simulations. Tout d'abord, on remarque que pour l'année 1998, les quantités mensuelles de sédiments en suspension à l'exutoire du bassin, simulées avec les données de télédétection sont sous-estimées par rapport aux mesures prises à la station 008. Pire encore, elles se révèlent dans l'ensemble moins bonnes que celles simulées avec les données des enquêtes terrain. Le mois de mars 1998 illustre cette situation. Toutefois, pour l'année 1999, la simulation avec les données de télédétection produit des résultats très encourageants. En effet, les quantités de sédiments simulées se rapprochent considérablement des données mesurées et elles sont nettement meilleures que celles de la simulation avec les données des enquêtes terrain. Le mois de septembre 1999 en est un bon exemple. Ces résultats prouvent sans équivoque l'effet de l'apport des données de télédétection sur les simulations, dans ce cas-ci, de la quantité de sédiments en suspension à l'exutoire du bassin. Effectivement, l'occupation du sol déterminée par la télédétection s'appuie sur une image de 1999. Ainsi, cette année de simulation s'avère beaucoup plus fidèle aux données mesurées à la station 008 en comparaison avec l'année 1998.

### 5.1.4.2 Qualité et quantité d'eau dans les tronçons de la Boyer Nord

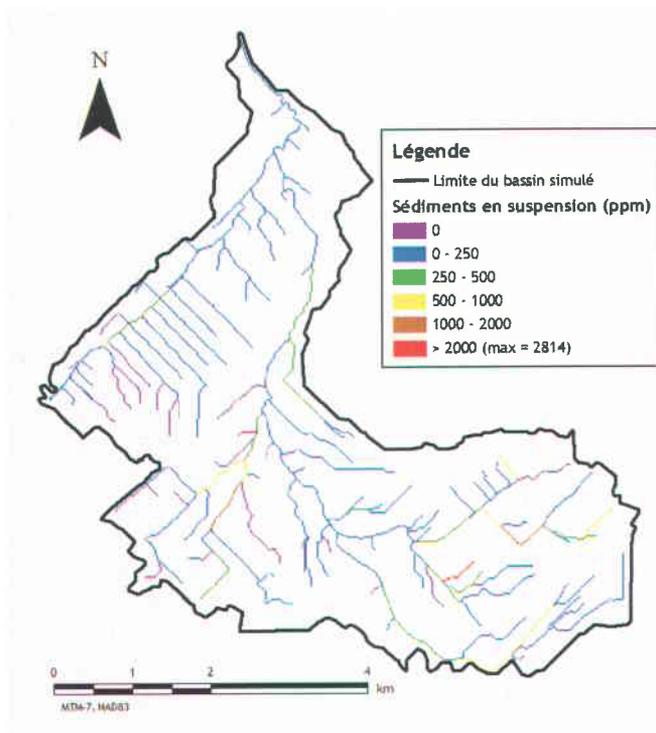


Figure 5.38 : Concentration des sédiments en suspension dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain

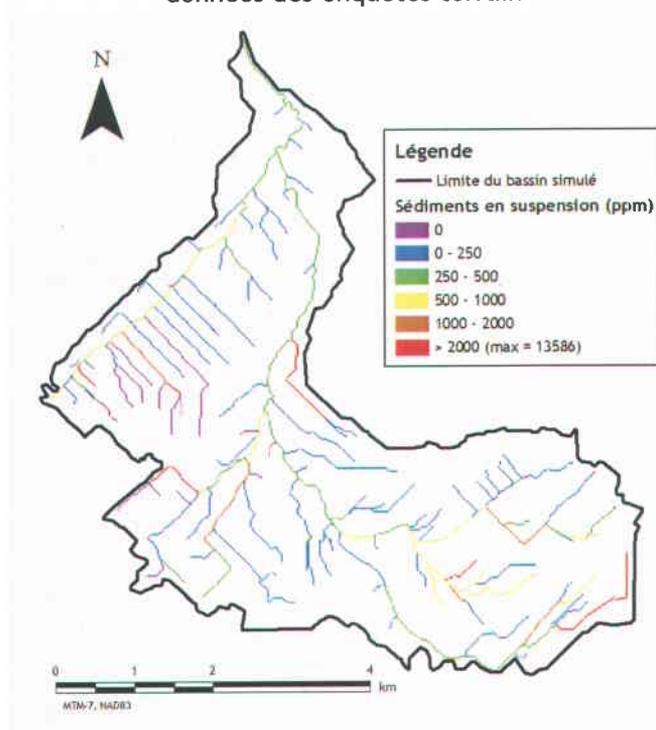


Figure 5.39 : Concentration des sédiments en suspension dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection

### 5.1.4.3 Contribution des cellules

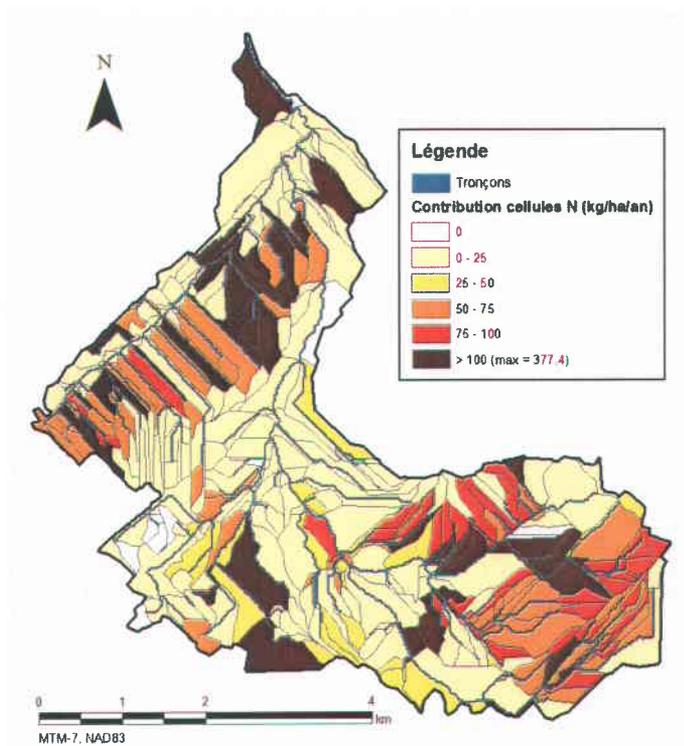


Figure 5.40 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en azote (absorbé et soluble) à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain

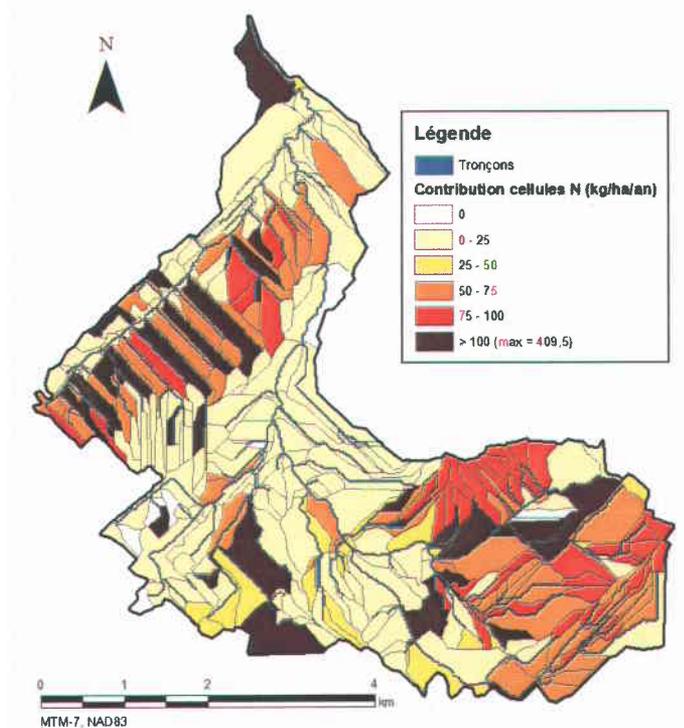


Figure 5.41 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en azote (absorbé et soluble) à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données de télédétection

## 5.2 Discussion

La présente section est structurée de manière à répondre aux hypothèses avancées dans l'introduction du mémoire. En s'appuyant sur les résultats présentés précédemment, la discussion a pour but d'expliquer et d'interpréter ceux-ci afin d'exprimer des constats concernant les hypothèses émises.

### 5.2.1 La télédétection permet-elle d'obtenir des informations adéquates concernant l'occupation du sol en vue de remplacer les entrevues traditionnellement effectuées auprès des agriculteurs?

Suite à l'analyse des résultats obtenus, il apparaît que le protocole développé dans le cadre de cette recherche, qui permet la transformation des données brutes de télédétection en intrants au modèle AnnAGNPS, constitue une solution exploitable et tangible. Toutefois, plusieurs contraintes émanant de diverses sources accompagnent cette solution et amènent inévitablement des réserves sur le simple remplacement des enquêtes terrain par la télédétection.

Les résultats des indicateurs de qualité pour la classification floue par objet AnnAGNPS s'avèrent excellents, ceux-ci se chiffrent largement au-dessus du 80 %. Ces résultats sont d'autant plus convenables qu'ils sont compilés avec les données de validation, ce qui n'est pas toujours le cas dans les études de ce genre. De plus, visuellement, les résultats de classification floue par objet AnnAGNPS offrent un produit clair et facilement interprétable pour quiconque. L'étude de comparaison statistique au niveau parcellaire révèle aussi une bonne corrélation entre les données obtenues par télédétection et celles provenant des enquêtes terrain (tableau 5.7). Ainsi, il semble que l'emploi d'un indice d'habitude de fertilisation de l'agriculteur s'est avéré une solution ingénieuse pour obtenir les codes de gestion AGNPS. Le simple croisement de cet indice, relativement invariant dans le temps, avec les données d'occupation du sol obtenues par télédétection a permis de retrouver les codes de gestion qui permettent d'alimenter AnnAGNPS.

Une des contraintes soulevée par l'emploi de l'indice d'habitude de fertilisation de l'agriculteur réside dans l'impossibilité d'utiliser uniquement les résultats de classification comme intrants au modèle. En effet, la structure d'AnnAGNPS, tel qu'employé à l'INRS-ETE, commande l'ajout de données complémentaires aux données d'occupation du sol pour déterminer les codes de gestion qui sont définis par diverses caractéristiques. L'objectif n'étant pas de modifier cette structure d'utilisation, il convient de se soumettre à cette contrainte qui est levée par la création de l'indice mentionné précédemment. En bref, en raison de cette exigence, il est important de posséder des informations complémentaires aux données de télédétection pour retrouver les codes de gestion AGNPS qui servent d'intrants directs au modèle.

La comparaison des occupations du sol au niveau cellulaire a révélé une autre lacune inhérente à la structure du modèle et qui limite l'impact de l'identification efficace des occupations du sol que ce soit par enquêtes terrain ou par télédétection. La transformation des parcelles dans un format cellulaire entraîne effectivement une perte d'information considérable. D'une corrélation de 80 % au niveau parcellaire, l'étude démontre que cette corrélation chute à 57 % au niveau des cellules (voir figures 5.33 et 5.36). Cela provient principalement des zones inconnues rencontrées au niveau des parcelles qui engendrent des erreurs d'interprétation et qui mènent à la création de cellules AnnAGNPS biaisées ou fausses car elles s'appuient sur le peu de données disponibles. Cette situation est illustrée à la figure 5.42.

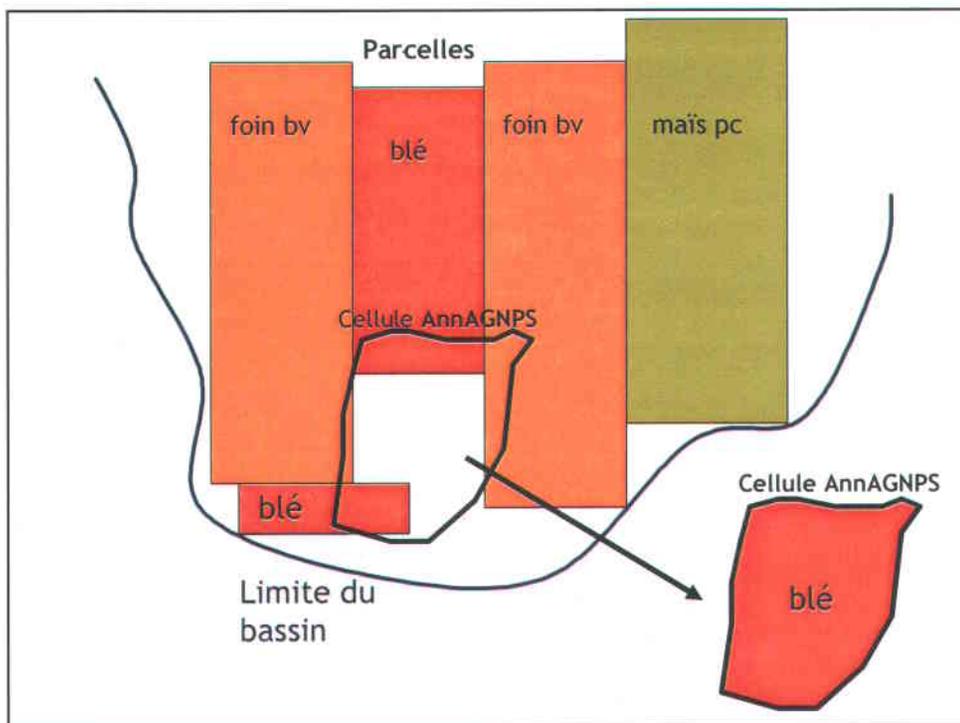


Figure 5.42 : Fonctionnement de l'assignation du contenu des cellules AnnAGNPS selon les parcelles (tiré d'Henry, 2004)

La figure 5.42 démontre bien le problème qui peut subvenir lorsque les données servant à l'assignation du code AGNPS de la cellule ne représentent qu'une petite partie de sa superficie, la majorité étant inconnue. De cette façon, un poids important est accordé à la faible superficie d'information disponible. Ce contexte est flagrant particulièrement lors de la création des cellules provenant des enquêtes terrain; les données parcellaires des entrevues occupent près de 422 ha de moins que les données parcellaires issues de la classification. Ainsi, le pourcentage de corrélation de 57 % au niveau cellulaire indique une correspondance peu élevée entre les deux méthodes d'acquisition de données mais il n'implique pas que la télédétection soit une technique moins exacte par rapport à la vérité terrain. En effet, les données cellulaires des enquêtes terrain s'appuient sur une plus petite superficie d'information ce qui se traduit indéniablement par une diminution de fiabilité. La dimension importante des cellules introduit aussi un biais non négligeable. Les cellules sont effectivement conçues selon une architecture hydrographique et leurs limites ne respectent pas la structure parcellaire ce qui amène la création de cellules qui couvrent un territoire très hétérogène quant à l'occupation du sol. Par exemple, une cellule AnnAGNPS peut chevaucher une dizaine de parcelles

exploitées pour diverses cultures. La cellule résultante reflète ainsi la plus grande superficie cultivée parmi les parcelles. Il devient donc difficile de justifier la poursuite d'une grande précision lors de l'identification des occupations si ces informations sont diluées lors de la création des cellules.

En ce qui a trait à la télédétection, il a été déterminé que différentes conditions régissent l'exploitation de ce type de données pour alimenter le modèle de simulation AnnAGNPS. Tout d'abord, il est évident que la période d'acquisition est déterminante pour l'obtention d'informations exploitables. Afin de posséder un portrait représentatif des occupations du sol, il est préférable de couvrir le territoire lorsque les cultures sont à un stade phénologique avancé mais précèdent le temps des récoltes ou de la coupe. Les dernières semaines du mois de juillet et les premières d'août sont toutes désignées pour répondre à ces conditions au Québec. Malgré les nombreuses incertitudes rendant difficile la comparaison entre les classifications des deux capteurs, cette affirmation semble être confirmée par les statistiques des pixels non classés. Ceux-ci occupent une superficie plus importante sur les classifications de l'image ASTER acquise plus tôt en saison par rapport à l'image Landsat-7 ETM+. La faible densité du couvert végétal et la prépondérance du sol dans le signal rendent plus hétéroclites les parcelles et donc plus difficilement associables à une classe thématique. D'ailleurs, cela explique probablement en partie que l'étape de définition des critères de décision lors de la classification floue par objet de l'image ASTER a été plus laborieuse. Les conditions météorologiques sont aussi un facteur limitant l'utilisation des données satellitaires optiques, un ciel dégagé au-dessus du bassin étant absolument essentiel à l'exploitation de celles-ci. Enfin, le protocole de classification développé nécessite un minimum d'information concernant les occupations du sol sur le bassin pour pouvoir être réalisé. De plus, il s'avère risqué de transposer les propriétés spectrales obtenues dans le contexte actuel pour réaliser une classification sur une image d'une autre année. Les chances de réussite sont minées par une multitude de facteurs relatifs au capteur, au développement des plantes, aux conditions climatiques, à l'absence de correction atmosphérique, à l'espace temporel, etc. Il faut donc prioriser une courte session de terrain servant à localiser quelques parcelles et à identifier les cultures qui les occupent en s'assurant de posséder un échantillon représentatif de chacune des thématiques et bien étendu géographiquement sur le bassin versant afin d'effectuer les classifications.

Les informations sur les cultures détectables par la télédétection restent limitées. Il a été impossible de reconnaître plusieurs classes de culture faisant partie de la définition des identifiants de culture (tableau 4.4) ou des codes de gestion AGNPS (tableau 4.5). Malgré une attention particulière portée lors de l'étape de sélection des bandes, il semble que celles-ci soient limitées à la distinction de quelques types de cultures. Les caractéristiques des capteurs, en plus des différentes contraintes liées à l'environnement de la scène, ne permettent donc pas d'atteindre une précision et une variété d'identification des cultures obtenue par les enquêtes terrain. Néanmoins, les cultures les plus importantes, soit le maïs et les prairies sont relativement bien distinguées par les classifications comme le révèle la matrice de confusion de la classification AnnAGNPS (voir tableau 5.2). Les zones urbaines et la forêt sont pour leur part identifiées avec précision.

En résumé, la télédétection est une avenue intéressante et exploitable pour déterminer l'occupation du sol sur le bassin versant de la Boyer Nord. Cependant, pour ce faire, il faut posséder des images qui répondent à certains critères, un échantillon de données pour l'année visée de même que des données complémentaires permettant d'établir les codes de gestion AGNPS. À défaut de remplacer complètement les enquêtes terrain, la télédétection est une solution qui peut simplifier grandement le processus autrement fastidieux de l'acquisition de données d'occupation du sol.

### **5.2.2 Les images ASTER constituent-elles une alternative intéressante et justifiée aux images Landsat-7 ETM+?**

Le contexte du projet rendait difficile, au départ, la réalisation d'une comparaison complexe et exhaustive des deux types de capteurs au niveau des classifications. Afin d'effectuer une telle comparaison, il est nécessaire de posséder deux images de même date et il est essentiel de disposer d'une vérité terrain fiable. La première condition est respectée grâce aux images du 19 juillet 2001. Cependant, la seconde n'est pas observée, les enquêtes terrain ayant eu lieu pour les années 1999 et 2000. Pour répondre à l'hypothèse posée, il faut donc examiner d'autres niveaux de comparaison. Toutefois, les cadres de référence similaires n'abondent pas entre les deux capteurs : la résolution, la dimension des bandes, le niveau d'acquisition, les prétraitements et d'autres détails varient selon les capteurs. Cette situation rappelle l'exemple classique de comparaison entre des pommes et des oranges. Pour contrer ce problème, une approche davantage subjective, faisant moins appel aux statistiques et se basant sur l'expérience acquise au cours du projet est privilégiée.

En premier lieu, les deux produits sont examinés selon leur état lors de leur réception. Malgré le fait que les deux images soient livrées sous deux niveaux d'acquisition différents, il est difficile d'expliquer le décalage notable qui afflige les bandes du capteur du moyen infrarouge d'ASTER. Ce problème important dont la source est obscure, rend l'application des prétraitements aux images ASTER fastidieuse et définitivement moins conviviale qu'avec les images ETM+. Les bandes du moyen infrarouge d'ASTER sont aussi affectées par un effet de lignage visuellement désagréable qu'il apparaît impossible d'éliminer complètement lors des prétraitements. La nature du capteur MIR, qui est un système de balayage parallèle à la trajectoire composé de 2048 cellules CCD, complique l'application d'une fonction de délignage par un logiciel de traitement d'images. Dans le même ordre d'idées, il semble que les logiciels de télédétection commerciaux offrent, à ce jour, peu de fonctionnalités adaptées spécifiquement aux images ASTER en comparaison avec les images de Landsat-7 ETM+. Ainsi, certaines étapes de prétraitements aisément réalisées sur les données ETM+ grâce aux outils spécialisés peuvent s'avérer plus périlleuses lorsque confrontées aux traitements de données ASTER.

En second lieu, les capteurs sont comparés selon les résultats statistiques exposés aux sections 5.1.2.1 et 5.1.2.2. Les dynamiques des moyennes spectrales par bande sont très semblables, les deux capteurs enregistrant une pointe de valeur pour la bande du proche infrarouge. L'écart entre les valeurs moyennes des bandes de chaque capteur se situe entre 0,05 et 5 % de réflectance. En ce qui concerne les intervalles de valeurs des réflectances, les valeurs minimales sont relativement proches entre les capteurs tandis que les valeurs maximales sont plus disparates, un écart de 45 % de réflectance existant entre la bande 3 de ETM+ et la bande 2 d'ASTER. L'étude des histogrammes de fréquences révèle une similarité évidente entre les bandes des capteurs en ce qui a trait à l'allure générale des graphiques. Seule la dynamique du premier couple de bandes apparaît moins analogue. Les profils linéaires des réflectances de la ligne 207 pour les deux capteurs confirment en partie ces observations sur les données globales. Les profils de réflectance des bandes correspondantes des capteurs démontrent une similarité certaine entre les données du capteur ASTER et les données du capteur ETM+. Toutefois, contrairement aux observations sur les histogrammes, la plus grande différence en termes de réflectance existe entre la bande 3 d'ASTER et la bande 4 de Landsat-7 ETM+ avec une moyenne de 6 % de réflectance divergente par pixel. Les ressemblances observées lors de ces comparaisons semblent confirmer la validité de l'utilisation des images ASTER pour remplacer des données ETM+.

Il est important de rappeler que le capteur ASTER possède une meilleure résolution spatiale que le capteur ETM+ pour les bandes du visible/proche infrarouge (15 m vs 30 m). Cet aspect n'a pas été pris en compte lors des comparaisons, les données ETM+ ayant été rééchantillonnées à une dimension de 15 m dans le but de mesurer la correspondance des capteurs à d'autres niveaux. Néanmoins, cette différence est notable et rend le capteur ASTER attirant pour certaines applications nécessitant une plus haute résolution. Dans le cas présent, l'identification visuelle de certains objets physiques comme des bâtiments ou des chemins a été beaucoup plus facile sur les images ASTER.

En définitive, le capteur ASTER semble une alternative intéressante et justifiée au capteur ETM+ du satellite Landsat-7. Le comportement spectral des bandes étudiées est similaire à celui des bandes de ETM+. Malgré quelques contraintes, le capteur ASTER permet certainement d'être exploité pour des applications associées

traditionnellement au capteur Landsat comme c'est le cas de l'identification de l'occupation du sol en milieu agricole. Enfin, il est nécessaire de rappeler que pour des fins de comparasion, l'ensemble de la richesse spectrale d'ASTER n'a pas été exploré. Celle-ci amène sans équivoque des informations supplémentaires qui permettent possiblement de mieux qualifier les états de surface que le capteur ETM+.

### **5.2.3 La méthode de classification floue par objet est-elle avantageusement comparable à la méthode de classification par maximum de vraisemblance?**

Au niveau statistique, la méthode de classification floue par objet affiche des résultats impressionnants en comparaison avec ceux obtenus avec la méthode du maximum de vraisemblance. Les indicateurs de qualité et le pourcentage de pixels non classés sont substantiellement meilleurs pour la première méthode vis-à-vis la seconde. La moyenne de l'indice de précision moyenne obtenue pour l'ensemble des classifications floues par objet se chiffre à 85 % tandis que cette moyenne est de 70 % pour les classifications par maximum de vraisemblance. Cette différence est encore plus marquée à l'examen des moyennes de l'indice Kappa qui se situent à 80 % pour la méthode de classification floue et à seulement 59 % pour la méthode du maximum de vraisemblance. La moyenne des pixels non classés pour chacune des méthodes démontre aussi un avantage marqué pour les classifications floues, 9 % par rapport à 14 %.

L'évaluation visuelle des résultats des classifications abonde dans le même sens que l'évaluation statistique; la classification floue par objet offre un produit fini plus achevé que la classification par maximum de vraisemblance. La première permet de retrouver les parcelles des agriculteurs homogènes et sans bruits visuels. Ainsi, dans le contexte du projet, l'approche objet procure un résultat plus intéressant que l'approche au niveau du pixel. Cet avantage est particulièrement bien illustré sur les classifications de l'image ASTER. Effectivement, l'effet de lignage présent sur la bande 6 du capteur MIR se répercute sur la classification du maximum de vraisemblance comme il est possible de le voir sur la figure 5.43 (agrandissement de la figure 5.13). La segmentation par objet du processus de classification floue élimine

entièrement ce type d'artefact en créant des zones moyennes de pixels, soit les objets. De manière prévisible (Smith et Fuller, 2001), les classifications par maximum de vraisemblance affichent à plusieurs endroits un pixel isolé dans un environnement différent de sa classe de même que des pixels seuls non classés. Il est à noter que ce type de bruit affectant ces classifications aurait pu être réduit par l'application de post-traitements. Les filtres de lissage (passe-bas) auraient été tout désignés pour ce type d'opération. Toutefois, il a été convenu lors de l'établissement des protocoles des classifications de ne pas utiliser de post-traitements.

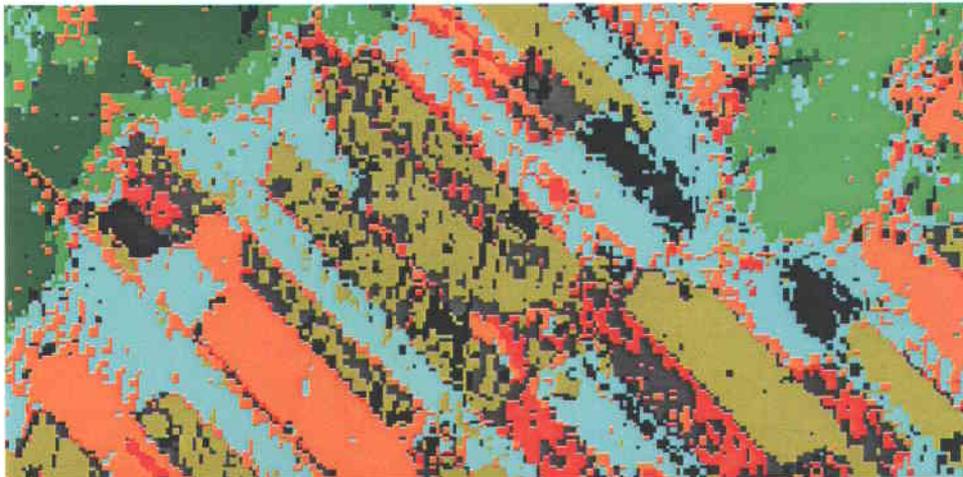


Figure 5.43 : Exemple de l'effet de lignage sur la classification par maximum de vraisemblance introduit par la bande 6 du capteur ASTER

L'intégration des données vectorielles dans le processus de classification floue par objet constitue l'élément déterminant pour l'obtention de ces résultats dans le cas de la présente recherche. En effet, ces données procurent un cadre structurel rigide guidant la segmentation par objet et conduisant à la création de zones homogènes qui respectent le canevas parcellaire des agriculteurs. Sur les figures 5.1, 5.2, 5.8 et 5.9, les objets situés sur la rive nord du cours d'eau, définis par les données vectorielles, illustrent ce constat par rapport à ceux situés sur la rive sud, qui sont créés uniquement à partir des paramètres de segmentation. Ainsi, il est utopique de penser qu'il aurait été possible de retrouver cette définition parcellaire simplement en ajustant les paramètres de segmentation du logiciel eCognition et sans l'aide des données vectorielles. La résolution des capteurs (15 m et 30 m) constitue le facteur limitant le plus notable pour obtenir de tels résultats. Il est donc essentiel, dans ce contexte, de disposer de données vectorielles fiables et bien structurées.

Le protocole de classification floue par objet s'avère plus complexe que celui de la méthode par maximum de vraisemblance. L'analyste doit posséder davantage de connaissances de base en télédétection pour pouvoir exploiter pleinement cette méthode de classification. En effet, l'ajustement des paramètres de segmentation s'avère très empirique. De la même façon, la définition des critères de décision est fortement subjective et peut prendre différentes formes selon l'interprétation de l'analyste. Cette étape de définition augmente incidemment le temps qui doit être consacré par l'analyste dans le protocole de classification floue. La réalisation de celui-ci s'avère donc, dans la majorité des cas, plus longue que l'application de la méthode par maximum de vraisemblance. De plus, malgré le fait que l'objectif du projet n'est pas d'évaluer le logiciel eCognition, il est important de préciser que la courbe d'apprentissage de celui-ci est relativement lente. Il n'apparaît pas comme un logiciel facilement accessible à des utilisateurs non-initiés aux fondements de la télédétection et du traitement d'images. D'un autre côté, PCI Geomatica n'est pas pour autant un logiciel d'une grande convivialité. Toutefois, les logiciels de télédétection et même les SIG qui offrent des fonctionnalités pour réaliser des classifications d'images par maximum de vraisemblance sont beaucoup plus nombreux que ceux pour la méthode de classification floue par objet. De ce fait, la méthode par maximum de vraisemblance semble plus accessible à un grand public que la méthode caractérisant eCognition.

Indépendamment de la méthode de classification employée, un questionnement peut-être soulevé concernant les définitions de classes thématiques utilisées. En effet, celles-ci sont basées principalement sur l'étude de l'analyse de superficie des identifiants de cultures (voir 4.1.3.1). Ce choix initial semble justifié étant donné le caractère flou du processus original de détermination des codes de gestion AGNPS. Néanmoins, une recherche plus approfondie à cette étape, au niveau du modèle de simulation, aurait probablement permis la création de définitions de classes thématiques davantage représentatives. Effectivement, la classe « légumineuses » apparaît maintenant bien inutile sachant qu'elle ne possède pas d'équivalence propre en termes de codes de gestion et qu'elle est regroupée sous l'appellation « foin ». Une distinction au niveau du type de forêt est aussi vaine du fait que la structure du modèle AnnAGNPS utilisée à l'INRS-ETE rassemble le territoire forestier sous une seule

classe « Forêt ». Cette même structure s'avère un obstacle à l'intégration d'autres classes thématiques qui apparaissent comme éventuellement utiles dans un contexte de pollution diffuse. Par exemple, aucune classe reliée aux sols nus ou aux sols en jachère n'est établie, la structure du modèle ne prenant pas en compte ce type d'occupation du sol. En résumé, les définitions de classes thématiques pour les classifications sont régies par la capacité de la structure d'AnnAGNPS à gérer et exploiter les différents types d'occupation du sol.

Bref, il apparaît que la méthode de classification floue par objet est avantageusement comparable à la méthode de classification par maximum de vraisemblance. L'évaluation de la qualité des classifications de même que l'évaluation visuelle de celles-ci le démontrent.

## 6 CONCLUSION

---

La faible disponibilité et les difficultés d'acquisition des données qui servent d'intrants dans les modèles de simulation constituent un problème inhérent à la compréhension des phénomènes reliés à la pollution diffuse agricole. L'objectif de cette recherche était d'évaluer les capacités de la télédétection à identifier l'occupation du sol dans le but d'alimenter le modèle de simulation agroenvironnemental AnnAGNPS. De façon spécifique, il s'agissait d'évaluer la pertinence de l'usage des images ASTER par rapport aux images Landsat-7 ETM+, de comparer l'intérêt de l'utilisation de la méthode de classification floue par objet vis-à-vis la méthode du maximum de vraisemblance dans le contexte d'identification culturelle et de développer une méthodologie pour intégrer les résultats de classification dans le modèle AnnAGNPS. Le territoire d'étude adopté pour cette recherche est le bassin versant de la rivière Boyer Nord, situé à une trentaine de kilomètres de la Ville de Québec. Ce bassin possède une histoire importante de pollution diffuse d'origine agricole qui a conduit à la dégradation importante de la faune et de la flore de la rivière.

Le projet était divisé selon deux avenues distinctes; une partie était consacrée à la télédétection tandis que l'autre touchait l'intégration des données des classifications dans le modèle de simulation AnnAGNPS.

La première partie de la recherche visait à déterminer l'occupation du sol du bassin versant de la Boyer Nord à l'aide d'images satellitaires et des outils reliés à la télédétection. Pour ce faire, des scènes des capteurs ASTER et Landsat-7 ETM+ ont tout d'abord été acquises. Les prétraitements de transformations géométriques et radiométriques ont ensuite été appliqués aux images. Puis, un protocole de classification a été établi pour chaque méthode soit un pour la classification floue par objet et un autre pour la classification par maximum de vraisemblance. Une étape de définition des classes thématiques à identifier a précédé le lancement des classifications. Par la suite, l'évaluation de celles-ci a été réalisée selon différents critères. Enfin, un processus de comparaison a été élaboré pour juger de l'intérêt de l'utilisation des images ASTER par rapport aux images Landsat-7 ETM+.

La seconde partie du travail consistait à développer un processus de transfert des informations issues des classifications des images satellites afin de les intégrer et les exploiter dans le modèle AnnAGNPS. Cette section a d'abord nécessité une analyse des données et une sélection des informations exploitables pour le transfert. Ensuite, une étape de croisement des données vectorielles, matricielles et agroenvironnementales a été complétée. L'intégration des données dans le modèle AnnAGNPS a donc pu être réalisée. Puis, une comparaison des occupations du sol obtenue par télédétection et par enquête terrain a été effectuée. Finalement, les simulations AnnAGNPS ont été lancées avec les données des classifications et les données des entrevues.

L'analyse des résultats a permis d'obtenir des réponses aux trois hypothèses avancées au début du mémoire. Ainsi, la télédétection apparaît comme une alternative intéressante et prometteuse aux enquêtes terrain afin d'identifier l'occupation du sol sur le bassin versant de la Boyer Nord. Néanmoins, dans le contexte du projet, la télédétection doit être employée en respectant certaines contraintes. Il faut d'abord posséder une image satellitaire acquise dans une fenêtre temporelle s'étendant de la fin juillet au début août et qui ne soit pas affectée par de mauvaises conditions météorologiques. Une alternative serait d'utiliser deux images ou plus qui couvrent des périodes différentes de l'année ce qui permettrait d'obtenir des distinctions plus nettes entre les cultures (Pax-Lenney et Woodcock, 1997 ; Oetter et al., 2001). Il faut ensuite disposer d'un échantillon d'information servant à localiser certaines parcelles et les cultures qui les occupent pour l'année visée. Enfin, dans le but de retrouver les codes de gestion AGNPS, il est essentiel de détenir des données complémentaires aux données de télédétection, dans ce cas-ci, des informations concernant l'habitude de fertilisation des agriculteurs. Bref, à défaut de remplacer totalement les enquêtes terrain, la télédétection constitue un moyen intéressant qui permet de simplifier substantiellement l'étape d'acquisition de données d'occupation du sol qui servent d'intrants au modèle de simulation AnnAGNPS.

En ce qui a trait à la comparaison des capteurs, l'utilisation d'ASTER semble adéquate par rapport à l'emploi du capteur Landsat-7 ETM+ dans l'identification de l'occupation du sol d'un territoire à vocation agricole. Hormis quelques différences mineures au niveau du comportement spectral des bandes et quelques contraintes inhérentes au

capteur ASTER, celui-ci peut avantageusement être utilisé pour des applications réservées historiquement au capteur Landsat-7 ETM+.

L'évaluation de la méthode de classification floue par objet en comparaison avec la méthode du maximum de vraisemblance démontre toute la puissance de la première. En effet, les résultats obtenus sont impressionnants tant au niveau visuel que statistique. La méthode de classification floue par objet s'avère robuste et achevée par rapport à la méthode du maximum de vraisemblance. Il faut cependant mentionner que les données vectorielles utilisées lors de la segmentation précédant la classification floue sont responsables en grande partie de l'efficacité de cette méthode.

Cette conclusion ne serait pas complète sans le rappel des divers problèmes rencontrés tout au long de la recherche ainsi que les recommandations qui en découlent. En ce qui concerne la télédétection et les classifications, il faut d'abord mentionner la difficulté d'acquisition des images qui peut survenir en raison des mauvaises conditions météorologiques et de la faible périodicité des satellites ASTER et Landsat-7. Ce problème majeur et incontrôlable ralentit fortement l'adoption et le développement de la télédétection pour des applications agricoles comme l'identification des cultures. Ensuite, il a été décidé de ne pas effectuer de correction atmosphérique, celle-ci étant jugée non essentielle. Toutefois, dans le contexte de comparaison des images des deux capteurs, il aurait possiblement été plus sage de le faire. Les différences observées entre les histogrammes de même que celles caractérisant les profils linéaires auraient probablement été réduites. Dans le même ordre d'idées, la comparaison des capteurs aurait été davantage complète si une vérité terrain avait été disponible pour l'année 2001, ce qui n'était malheureusement pas le cas.

Pour ce qui est des classifications, la bonne représentation du territoire s'appuie sur la qualité des sites d'entraînement et, donc, de la vérité terrain. L'hypothèse posée est que cette vérité terrain assemblée lors des travaux précédents est fidèle au paysage du bassin de la Boyer Nord. Il faut prendre conscience qu'une partie de l'incertitude résultant des classifications peut provenir du niveau de fiabilité de la vérité terrain. Il est toutefois difficile de quantifier cette incertitude possiblement introduite par celle-ci. De plus, les résultats de la méthode floue par objet sont intimement reliés à la

qualité des données vectorielles. Cette qualité n'a pas été mise en doute dans le projet actuel, cependant l'origine de ces données reste obscure et il serait intéressant dans le futur de revoir le canevas parcellaire. Une mise à jour pourrait être effectuée simplement en ayant recours à une image ASTER ce qui permettrait, grâce à la résolution convenable du capteur, de bien délimiter les frontières des parcelles et d'exclure les artifices pouvant influencer le signal des cultures (bâtiments, routes, fossés, bandes riveraines, arbres isolés, etc.).

La réalisation de l'étape du transfert des résultats de la télédétection vers le modèle AnnAGNPS a aussi dû faire face à quelques embûches. La majorité de ces problèmes a émané du manque de documentation détaillée concernant les différents travaux réalisés sur le modèle AnnAGNPS à l'INRS-ETE. Les travaux d'Henry (2004) avaient d'ailleurs pour but d'éclairer les futurs utilisateurs sur le modèle et tout ce qui l'entoure.

Enfin, il a été observé que l'architecture du modèle AnnAGNPS, tel qu'employé à l'INRS-ETE, limite l'impact de la recherche d'une plus grande précision lors de l'identification de l'occupation du sol par télédétection et ce, à plusieurs niveaux. D'une part, le respect des codes de gestion AGNPS établis dans les études précédentes empêche l'intégration de nouvelles classes d'occupation qui pourraient améliorer la qualité des simulations agroenvironnementales. Par exemple, aucune classe traduisant la présence de sol à découvert n'est incluse dans les codes de gestion AGNPS. Il serait aussi intéressant de pouvoir distinguer la nature générale du couvert forestier : feuillu, conifères, mixte. De plus, à la lueur des travaux, l'existence de certaines classes apparaît inutile. C'est le cas des classes « Engrais vert », « Pâturage bv » et « Pâturage pc ». D'autre part, la recherche a démontré que l'architecture cellulaire d'AnnAGNPS occasionne un biais non négligeable dans l'identification des occupations. En effet, les cellules, telles qu'elles sont structurées présentement minimisent la précision obtenue à l'aide des classifications en généralisant l'information qui alimente le modèle. Pour contrer ce problème, il serait intéressant, dans le cadre d'une étude ultérieure, de revoir la structure cellulaire en créant des cellules hydrographiques AnnAGNPS de plus petite superficie.

La pollution diffuse d'origine agricole reste un problème d'actualité et il est à prévoir qu'elle le demeurera pendant encore longtemps. L'emploi des modèles de simulation agroenvironnementaux permet de mieux comprendre les phénomènes reliés à ce type de pollution, mais encore faut-il que les données qui alimentent ces modèles soient disponibles. La présente recherche a démontré qu'il était possible et avantageux d'utiliser la télédétection pour simplifier le processus d'acquisition de données concernant l'occupation du sol d'un bassin versant.



## RÉFÉRENCES

---

- Abou El-Magd, I. et T. W. Tanton. (2003). Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 21, p. 4197-4206.
- Adams, M., S. Hook et B. Ramachandran. (2002) *ASTER User Handbook version 2*. Pasadena, California, NASA, 135 pages.
- Basnyat, P., L. D. Teeter, B. G. Lockaby et K. M. Flynn. (2000). The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems. *Forest Ecology and Management*, vol. 128, no. 1-2, p. 65-73.
- Bernier, M, K. P. H. Thomson et D. N. H. Horler. (1984). L'aptitude des satellites LANDSAT et SPOT à distinguer les cultures de maïs dans l'est du Canada. *Journal canadien de télédétection*, vol. 10, no. 1, p. 31-45.
- Bhuyan, S. J., J. K. Koelliker, L. J. Marzen et Jr. J. A. Harrington. (2003). An integrated approach for water quality assessment of a Kansas watershed. *Environmental Modelling & Software*, vol. 18, no. 5, p. 473-484.
- Bonn, F. et G. Rochon. (1992) *Principes et Méthodes. Précis De Télédétection*, vol. 1. Sainte-Foy, Québec, Presses de l'Université du Québec, 485 pages.
- Brandt, T. et P. Mather. (2001) *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. New York, Taylor & Francis, 352 pages.
- Caloz, R. et C. Collet. (2001) *Traitements numériques d'images de télédétection. Précis De Télédétection*, vol. 3. Sainte-Foy, Québec, Presses de l'Université du Québec, 386 pages.
- Caloz, R. et A. Pointet. (2003). Analyse comparative de la classification contextuelle et du maximum de vraisemblance: synthèse et cas d'étude. *Télédétection*, vol. 3, no. 2-3-4, p. 311-322.

- Chapon, B. (2002) *Application du modèle AnnAGNPS au bassin versant de la Boyer-Nord*. [Rapport de stage]. Sainte Foy, Québec, INRS-ETE, 102 pages.
- Chardonneau, G. (2000) *De la simplicité d'un modèle à la complexité du terrain*. [Rapport de fin d'étude d'ingénieur]. Sainte-Foy, Québec, INRS-Eau, Université du Québec, 96 pages.
- Corwin, D. L. et R. J. Wagenet. (1996). Application of GIS to the Modeling of NonPoint Source Pollutants in the Vadose Zone: A Conference Overview. *Journal of Environmental Quality*, vol. 25 p. 403-411.
- Definiens Imaging GmbH. (2002) *eCognition User guide 3*. [Guide de l'utilisateur]. Munich, 480 pages.
- Flanders, D., M. Hall-Beyer et J. Pereverzoff. (2003). Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, p. 441-452.
- Gangbazo, G., D. Cluis et E. Buon. (2002). Transport des sédiments en suspension et du phosphore dans un bassin versant agricole. *Vecteur Environnement*, vol. 35, no. 1, p. 43-54.
- Garbrecht, J. et L. W. Martz. (1999) *TOPAZ OVERVIEW*. Oklahoma, USDA, Agricultural Research Service, 19 pages.
- Gomes, A. et A. R. S. Marçal. (2003). Land cover revision through object based supervised classification of ASTER data. *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*.
- Henry, F. (2004) *Extraction d'informations utiles à la modélisation de l'érosion en milieu agricole: transfert de résultats de la télédétection vers le modèle agroenvironnemental AnnAGNPS*. [Rapport de stage]. Sainte-Foy, Québec, INRS-ETE, Université du Québec.
- Landry, C. (2001) *Premier essais québécois du modèle de pollution diffuse agricole AnnAGNPS*. [Mémoire ès Sciences]. Sainte-Foy, Québec, INRS-Eau, Université du Québec, 129 pages.

- Landry, I. (1998) *Analyse par géomatique des bilans et des flux d'azote et de phosphore*. [Mémoire ès Sciences]. Sainte-Foy, Québec, INRS-Eau, Université du Québec , 139 pages.
- Lavoie, S., M. C. Nolin et J. L. Sasseville. ( 1995). Pollution issue de l'épandage d'engrais de ferme sur les terres agricoles: causes et processus. *Agrosol*, vol. 8, no. 1, p. 43-50.
- Lelong, C. C. D., P. C. Pinet et H. Poilve. (1998). Hyperspectral Imaging and Stress Mapping in Agriculture: A Case Study on Wheat in Beauce (France). *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, no. 2, p. 179-191.
- Lu, S., E. Moran et M. Batistella. (2003). Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, no. 4, p. 456-469.
- Mabit, L., M. Duchemin, M. R. Laverdière et C. Bernard. (2004). Quantification de l'érosion hydrique et étude de l'origine des sédiments colmatant la fraysère de la rivière Boyer (Québec). *Vecteur Environnement*, vol. 37, no. 2, p. 80-89.
- Marzen, L. J., J. A. Harrington, S. J. Bhuyan et J. K. Koelliker. (2000). Use of satellite imagery to determine land cover input variables in an AGNPS water quality model. *Technical Paper ASAE*, no. 002200.
- Moran, S., G. Fitzgerald, A. Rango, C. Walthall, E. Barnes, W. Bausch, T. Clarke, C. Daughtry, J. Everitt, D. Escobar, J. Hatfield, K. Havstad, T. Jackson, N. Kitchen, W. Kustas, M. McGuire, P. Pinter, K. Sudduth, J. Schepers, T. Schmugge, P. Starks et D. Upchurch. (2003). Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, no. 6, p. 705-718.
- Moulin, S., A. Bondeau et R. Delécolle. (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 6, p. 1021-1036.

- Oetter, D. R., W. B., Cohen, M. Berterretche, T. K. Maiersperger et R. E. Kennedy. (2001). Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, no. 2, p. 139-155.
- Patoine, M. et M. Simoneau. (2002). Impacts de l'agriculture intensive sur la qualité de l'eau des rivières au Québec. *Vecteur Environnement*, vol. 35, no. 1, p. 61-66.
- Pax-Lenney, M. et C. E. Woodcock. (1997). Monitoring Agricultural Lands in Egypt with Multitemporal Landsat TM Imagery : How many Images Are Needed?. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, no. 3, p. 522-529
- PCI Geomatics. (2003) *Using OrthoEngine*. Geomatica Prime Help Version 9.0, Richmond Hill.
- Preti, F. (1996). Main topics and recent experiences for environmental monitoring and modelling diffuse pollution. *Water Science and Technology*, vol. 33, no. 4-5, p. 63-72.
- Proulx, S., D. Cluis et M.-J. Racine. (2002) [Rapport de recherche No. R-625]. Sainte-Foy, Québec, INRS-ETE, Université du Québec, 120 pages.
- Richards, J. A. (1993) *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction*. Berlin, Allemagne, Springer-Verlag, 340 pages.
- Rogan, J., J. Franklin et D. D. Roberts. (2002). A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no. 1, p. 143-156.
- Schiewe, J., L. Tufte et M. Ehlers. (2001). Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *Geobit GIS*, no. 6, p. 34-39.
- Smith, G. M. et R. M. Fuller. (2001). An integrated approach to land cover classification: an example in the Island of Jersey. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 16, p. 3123-3142.

- Song, C., C. E. Woodcock, K. C. Seto, M. P. Lenney et S. A. Macomber. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, no. 2, p. 230-244.
- Su, Z. (2000). Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 2, p. 213-233.
- Tim, U. S. et R. Jolly. (1994). Evaluating Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrated Geographic Information Systems and Hydrologic/Water Quality Model. *Journal of Environmental Quality*, vol. 23, no. 1, p. 25-35.

- Williams, V. L., W. R. Philipson et W. D. Philpot. (1987). Identifying vegetable crops with LANDSAT Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, no. 2, p. 187-191.
- Yamaguchi, Y., H. Fujisada, H. Tsu, I. Sato, H. Watanabe, M. Kato, M. Kudoh, A. B. Kahle et M. Pniel. (2001). Aster early image evaluation. *Advances in Space Research*, vol. 28, no. 1, p. 69-76.
- Young, R. A., Onstad C. A., Bosch D. D., et Anderson W. P.. 1989. AGNPS: A non point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 44, no. 2: 168-73.

# **ANNEXE A**

**Orthophotographies et images aéroportées**



# 1 Caractéristiques des orthophotographies du MRN

Les orthophotographies sont produites par le ministère des Ressources Naturelles (MRN) du Québec à des fins de révision des cartes topographiques à l'échelle 1 : 20 000. Elles constituent, avec les cartes topographiques numériques, une source d'information géographique qui peut satisfaire une multitude de besoins en gestion des données. Les orthophotographies sont à une échelle 1 : 40 000 et elles se présentent dans un format d'image TIFF.

Les fichiers d'orthophotographies sont réalisés suite à un balayage optique. Chaque fichier est composé de 8 000 lignes de 8 000 pixels chacune, et la dimension d'un pixel représente 1 mètre sur le terrain. Une orthophotographie couvre une superficie de 64 kilomètres carrés.

4 orthophotos ont été acquises auprès du MRN. Ce sont les images dénommées 00801132F07, 00801134F07, 00802027F07 et 00802029F07. La nomenclature des orthophotos est la suivante :

- «Nom de fichier à 11 caractères, selon la séquence suivante : AARRRPPFFF (exemple : 00801132F07)
- AA = année (00 pour 2000)
- RRR = numéro du rouleau de film (rouleau no. 801)
- PPP = numéro de la photographie (photo no. 132)
- FFF = fuseau MTM numéroté de 02 à 10 (fuseau no. F07)

La figure A.1 illustre les centroïdes des 4 orthophotos obtenues.

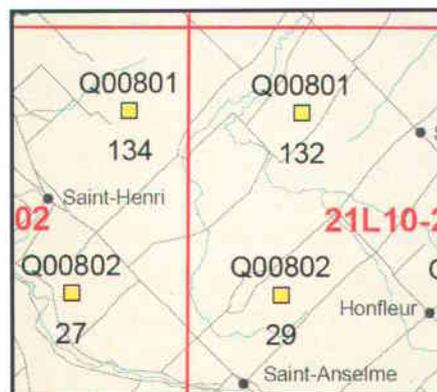


Figure A.1 : Centroïdes des orthophotographies

## 2 Caractéristiques des images aéroportées

---

En mai 2002, une série d'images aéroportées ont été prises au-dessus du bassin de la rivière Boyer Nord. Ces images acquises par une caméra DuncanTech MS-3100 sont composées de 3 bandes spectrales; une verte ( $0,55 \mu\text{m} \pm 0,035$ ), une rouge ( $0,65 \mu\text{m} \pm 0,035$ ) et une proche infrarouge ( $0,80 \mu\text{m} \pm 0,04$ ). Au total, 217 images ont été prises dispersées sur 12 lignes de vol. La résolution spatiale est d'environ 1 m et la superficie couverte par une image est d'environ  $1 \text{ km}^2$ . Les clichés sont en format TIFF. Les images originales ne sont pas géoréférencées et elle n'ont subi aucune correction radiométriques.

Dans le but d'exploiter les images aéroportées, il est nécessaire de leurs appliquées des transformations géométriques. De plus, étant donné la faible couverture offerte par une image unique, il est préférable de les regrouper sous forme de mosaïque pour tirer profit de ce type d'image. Les paragraphes suivants expliquent en détail la démarche employée pour géoréférencer les images et les assembler pour en faire une mosaïque.

La première étape consiste à transformer le DATUM, de NAD27 à NAD83, du fichier vecteur contenant les lignes de vol dans le but de visualiser les images couvrant le bassin de la rivière Boyer Nord. Seules ces images sont géoréférencées puis assemblées pour faire une mosaïque. Pour effectuer cette transformation, le logiciel FME Universal Translator de la compagnie Safe Software est utilisé. Une version de démonstration des logiciels FME Suite a été téléchargée sur le site de la compagnie ([www.safe.com](http://www.safe.com)). La conversion effectuée, il est possible de visualiser les lignes de vol dans le SIG ArcGis 8.x, de la compagnie ESRI, avec les données des limites du bassin de la Boyer Nord. Ainsi, les lignes de vol 1 à 7 sont identifiées comme couvrant le secteur d'intérêt.

La deuxième étape consiste à géoréférencer les images des lignes de vol ciblés. Pour ce faire, le module OrthoEngine du logiciel de traitements d'images PCI Geomatica est employé. À noter qu'aucune transformation radiométrique n'est réalisée. La faible altitude de la prise de photo laisse présager que des corrections atmosphériques ne

sont pas nécessaires. Pour effectuer la correspondance des images aéroportées avec des points connus au sol, les orthophotographies du MRN sont utilisées.

La méthode recourue pour exécuter la transformation géométrique est la méthode polynomiale de degré 2. À l'aide des orthophotographies du MRN, une douzaine de points d'appuis sont captés pour chaque image. Une attention particulière a été prise pour s'assurer que les points d'appuis soient collectés sur l'ensemble de l'image le plus uniformément possible. Les résiduelles obtenues lors de la prise de points d'appuis (RMS) se doivent d'être inférieure à 1 pixel pour chaque image avant d'engendrer la transformation. La méthode de rééchantillonnage choisie est l'interpolation bilinéaire qui donne un effet plus naturel que la méthode du plus proche voisin et dont le temps de calcul est moins long que la méthode cubique. Ainsi, sur un total de 217 images, 100 sont géoréférencées.

La troisième et dernière étape comporte l'assemblage des images dans le but de créer une mosaïque couvrant l'ensemble du bassin versant de la Boyer Nord. Tout d'abord, à l'aide des limites du bassin en format vecteur, les images couvrant l'extérieur du bassin sont identifiées et mises de côté. Les images conservées sont présentées dans le tableau A.1. Par la suite, les images sont assemblées de manière automatique. La méthode de sélection des lignes de coupures dans les images est imposée selon la différence minimum relative (Minimum relative difference). Ce choix s'appuie sur l'évaluation visuelle des trois méthodes, les deux autres étant "Minimum difference" et "Edge Features".

Tableau A.1 : Images comprises dans la mosaïque selon les lignes de vol

Lignes de vol	Images incluses dans la mosaïque	Nombre d'images
1	3 à 10	8
2	8 à 20	13
3	4 à 18	15
4	9 à 26	18
5	2 à 18	17
6	22 à 25	4
7	8 à 14	7
	<b>Total :</b>	<b>82</b>



**ANNEXE B**  
**Projection MTM**



# 1 Caractéristiques de la projection MTM

---

Pour certains travaux de cartographie à grande échelle, le système de projection Universal Transverse Mercator (UTM) présente moins d'intérêt car les déformations sont trop grandes. Pour cette raison, le système Mercator Transverse Modifié a été créé. Ce système est divisé en zones de 3° comparativement aux zones du système UTM qui sont de 6°. Le facteur échelle de MTM au méridien central est de 0,9999 tandis que celui de UTM est de 0,9996. Ces caractéristiques du système MTM engendrent des déformations moins importantes et permettent de mieux satisfaire les besoins associés à une cartographie plus locale. À noter que l'ellipsoïde de référence est le même que pour le système UTM, la latitude d'origine est l'équateur et l'abscisse sur le méridien central est à 304 800 mètres.

Le territoire du bassin versant de la rivière Boyer Nord se retrouve à l'intérieur de la zone 7 du système de projection MTM qui est centré sur le méridien 70°30'00'' O.



# **ANNEXE C**

## **Transformations géométriques**



# 1 Transformations géométriques

## Images Landsat-7 ETM+

Tableau C.1 : Données concernant la précision de la transformation géométrique de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

	Bandes	3-4-5-7
14 juillet 1999	Nombre de points d'appuis	16
	RMS X (pixel)	0,23
	RMS Y (pixel)	0,16
	RMS Total (pixel)	0,23
19 juillet 2001	Nombre de points d'appuis	17
	RMS X (pixel)	0,19
	RMS Y (pixel)	0,17
	RMS Total (pixel)	0,21

## Images ASTER

Tableau C.2 : Données concernant la précision des transformations géométriques de l'image ASTER du 23 juin 2000

	Bandes	2-3	4	6
23 juin 2000	Nombre de points d'appuis	18	17	16
	RMS X (pixel)	0,39	0,30	0,28
	RMS Y (pixel)	0,22	0,27	0,31
	RMS Total (pixel)	0,40	0,36	0,32
19 juillet 2001	Nombre de points d'appuis	18	16	15
	RMS X (pixel)	0,30	0,54	0,46
	RMS Y (pixel)	0,27	0,31	0,17
	RMS Total (pixel)	0,44	0,53	0,39



## **ANNEXE D**

**Analyse de l'occupation du sol**



# 1 Analyse de l'occupation du sol du bassin de la rivière Boyer Nord selon les données recueillies sur le terrain

## Niveau parcellaire

Les statistiques compilées au niveau parcellaire sont issues des entrevues réalisées auprès des agriculteurs et contiennent les classes de cultures inventoriées suites à ces rencontres.

1999 :

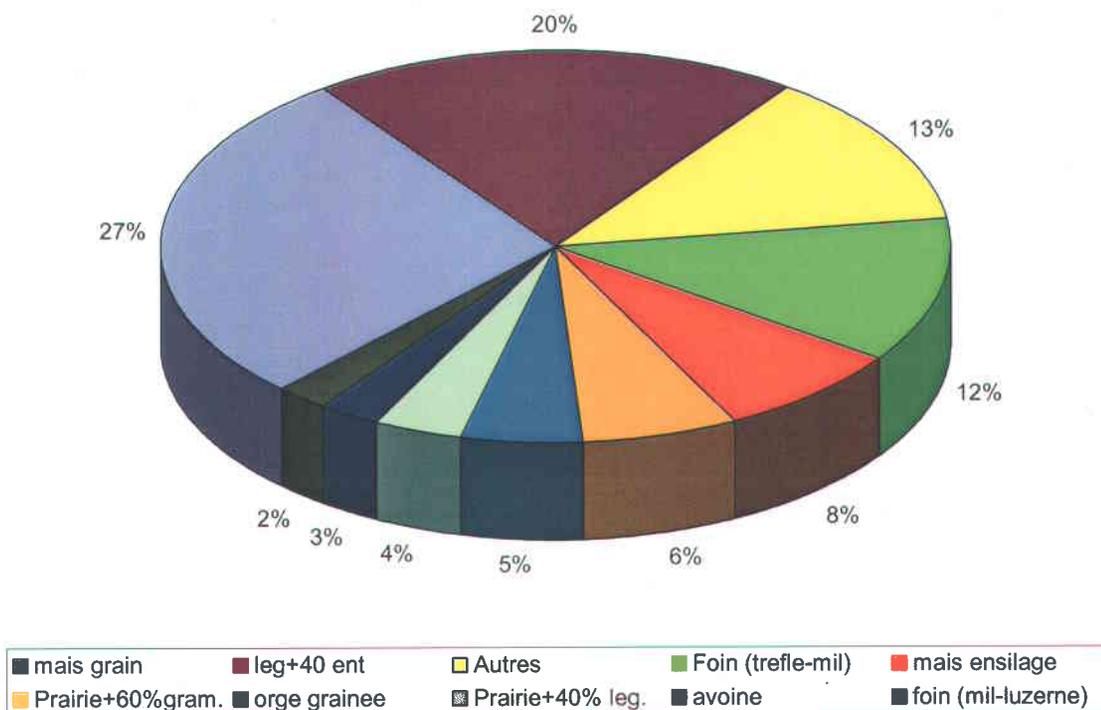


Figure D.1 : Répartition graphique de la superficie des cultures occupant les champs des agriculteurs interrogés, exprimée en pourcentage pour l'année 1999

Tableau D.1 : Analyse de l'occupation du sol des parcelles connues par entrevues en fonction de leur superficie pour l'année 1999

IdCulture	Culture ou espèce	Aire (Hectare)	% d'occupation
1	leg+40 ent	240,56	20,00
2	mais ensilage	94,69	7,87
3	blé	23,38	1,94
4	orge graine	60,54	5,03
5	paturage graminee	22,26	1,85
6	mais grain	332,77	27,66
7	soya	0,00	0,00
8	Foin (trefle-mil)	141,81	11,79
9	Foin (dactyle)	0,00	0,00
10	Foin (mil)	10,53	0,88
11	Prairie+40% leg.	43,74	3,64
12	paturage+60% gram.	2,67	0,22
13	Prairie+60%gram.	76,21	6,34
14	moutarde blanche	0,00	0,00
15	prairie+80% leg.	0,00	0,00
16	avoine	30,08	2,50
17	trefle	1,77	0,15
18	ble-avoine	13,71	1,14
19	aucun	0,00	0,00
20	grains meles	16,07	1,34
21	triticale-pois	8,59	0,71
22	engrais vert	0,00	0,00
23	prairie semis	16,93	1,41
24	canola print.	0,00	0,00
25	orge pure	3,61	0,30
26	foin (dactyle-brome)	16,21	1,35
27	foin (mil-luzerne)	25,89	2,15
28	avoine-trefle	5,72	0,48
29	foin (brome-mil)	2,34	0,19
30	paturage (trefle blanc-gram)	3,27	0,27
31	herbe (gazon)	0,00	0,00
32	foin (trefle-mil-luzerne)	9,53	0,79

2000 :

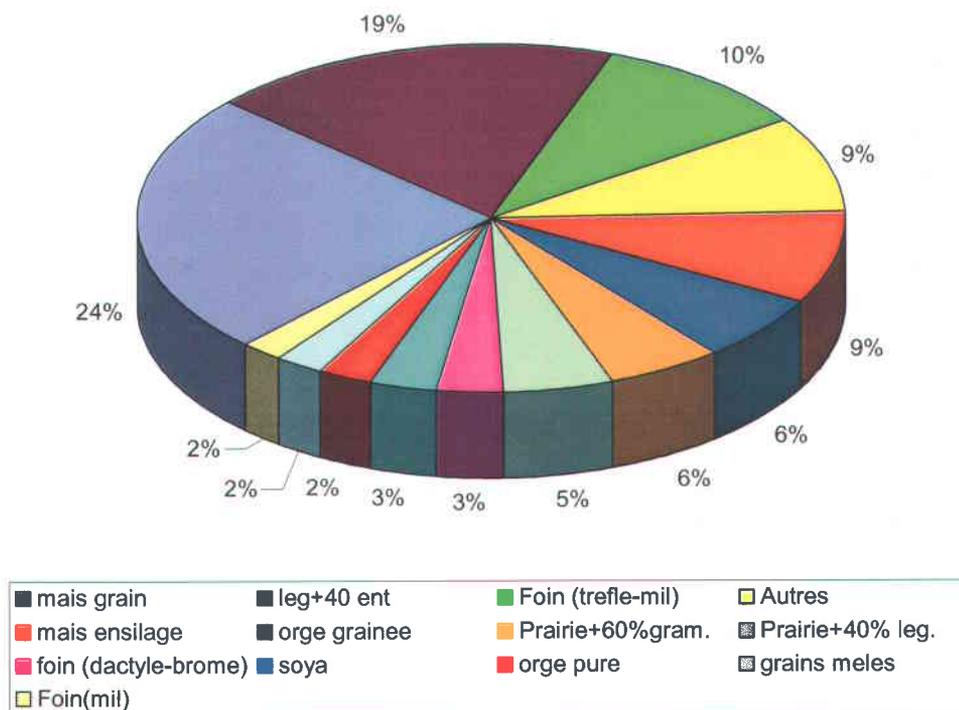


Figure D.2 : Répartition graphique de la superficie des cultures occupant les champs des agriculteurs interrogés, exprimée en pourcentage pour l'année 2000

Tableau D.2 : Analyse de l'occupation du sol des parcelles connues par entrevues en fonction de leur superficie pour l'année 2000

IdCulture	Culture ou espèce	Aire (Hectare)	% d'occupation
1	leg+40 ent	232,16	18,73
2	mais ensilage	107,51	8,67
3	blé	8,05	0,65
4	orge graine	75,15	6,06
5	paturage graminee	12,15	0,98
6	mais grain	303,55	24,49
7	soya	37,53	3,03
8	Foin (trèfle-mil)	123,74	9,98
9	Foin (dactyle)	4,87	0,39
10	Foin(mil)	25,06	2,02
11	Prairie+40% leg.	61,39	4,95
12	paturage+60% gram.	0,00	0,00
13	Prairie+60%gram.	68,52	5,53
14	moutarde blanche	0,00	0,00
15	prairie+80% leg.	0,00	0,00
16	avoine	1,96	0,16
17	trèfle	0,00	0,00
18	ble-avoine	13,71	1,11
19	aucun	0,00	0,00
20	grains meles	26,77	2,16
21	triticale-pois	6,72	0,54
22	engrais vert	5,53	0,45
23	prairie semis	18,98	1,53
24	canola print.	0,00	0,00
25	orge pure	29,49	2,38
26	foin (dactyle-brome)	38,50	3,11
27	foin (mil-luzerne)	23,06	1,86
28	avoine-trèfle	0,00	0,00
29	foin (brome-mil)	2,34	0,19
30	paturage (trèfle blanc-gram)	3,27	0,26
31	herbe (gazon)	0,00	0,00
32	foin (trèfle-mil-luzerne)	9,53	0,77

## Niveau cellulaire

Au niveau cellulaire, les statistiques proviennent de la conversion d'une part des cultures en code AnnAGNPS et d'autre part des parcelles en cellules hydrologiques. À noter que seules les statistiques de l'année 1999 sont présentées. En effet, les codes AnnAGNPS existent uniquement pour 1999 et comme le processus de conversion des cultures vers les codes est inconnu, il est impossible de déterminer ceux de 2000 à partir des cultures parcellaires de cette même année.

### 1999 :

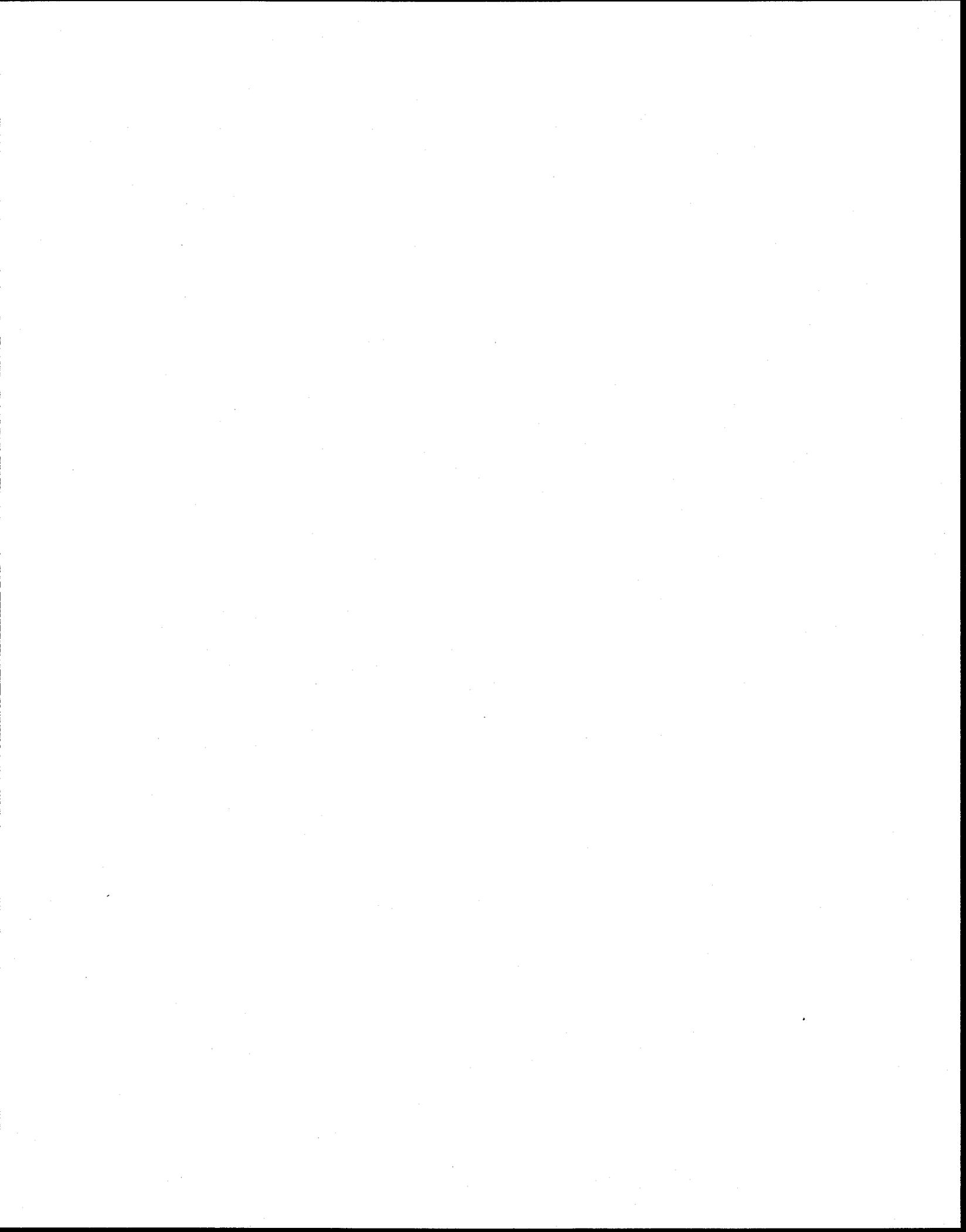
Tableau D.3 : Analyse de l'occupation du sol des cellules AnnAGNPS en terme de superficie pour l'année 1999

Code AnnAGNPS	Description	% superficie
1	avoine	2,90
2	blé	5,01
4	engrais vert	0,32
5	foinbv	34,65
6	foinpc	8,33
7	maïs ensilage	7,40
8	maïs grain1 bv	7,60
9	maïs grain 1 pc	6,55
10	maïs grain2 bv	2,73
11	maïs grain2 pc	1,08
12	maïs grain3	9,08
13	paturagebv	1,01
14	paturagepc	0,64
15	orge	5,00
16	paturage ou foin sans épandage	7,40



## **ANNEXE E**

**Création du fichier vectoriel**



# 1 Création du fichier vectoriel

---

Le processus de création du fichier vectoriel final, pouvant être exploité dans la segmentation par objet, est composé de plusieurs étapes. En premier lieu, le fichier original des parcelles est récupéré. Ce fichier provient des travaux de Landry (Landry, 2001) et semble avoir été conçu en numérisant des cartes cadastrales en format papier des municipalités situées sur le bassin versant de la Boyer Nord et en alliant à celles-ci des informations récoltées sur le terrain par Pomares. En second lieu, à l'aide de la mosaïque des orthophotographies et de cartes papier, une vérification complète de la géoréférence, du bon positionnement et du contenu descriptif des parcelles est réalisée. Par la suite, toujours selon la mosaïque, les limites des zones forestières et urbaines sont ajoutées au fichier vectoriel de parcelles. De la même façon, les berges de la rivière Etchemin sont numérisées. En quatrième lieu, un nettoyage topologique des données s'impose. En effet, la qualité des données vectorielles est primordiale pour l'efficacité des traitements ultérieurs réalisés avec eCognition. Ainsi, les parcelles qui se superposent, sont jointes proprement de manière à ce que le logiciel puisse effectuer une classification optimale. Des espaces vides subsistent, représentant des routes, des cours d'eau ou des bâtiments. Enfin, la dernière étape est de supprimer dans la base de données associée au fichier vectoriel (fichier dbf) toutes les parcelles dont la taille est inférieure à 100 m<sup>2</sup> (artefacts issus de la création même de ces parcelles).



## **ANNEXE F**

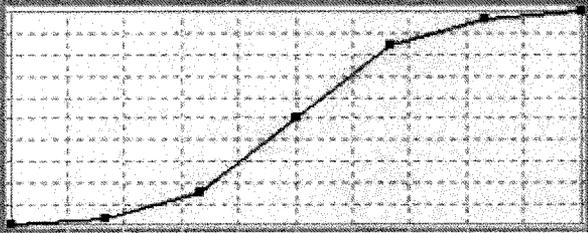
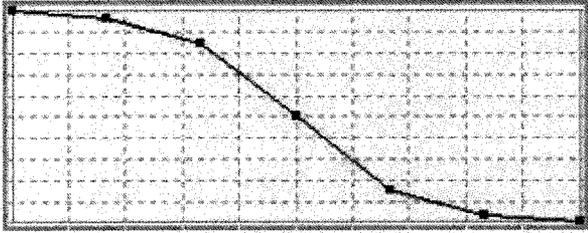
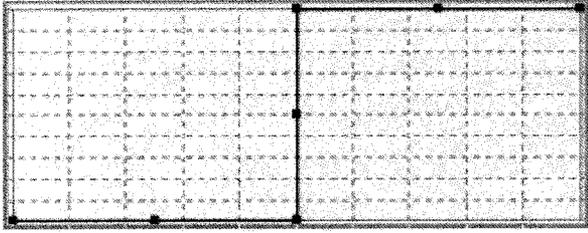
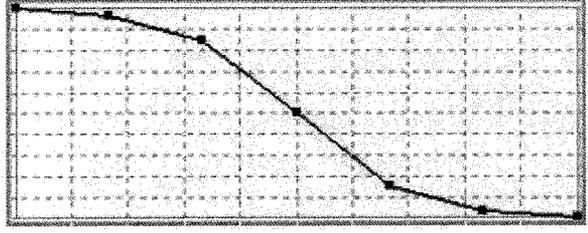
**Critères de décision eCognition**

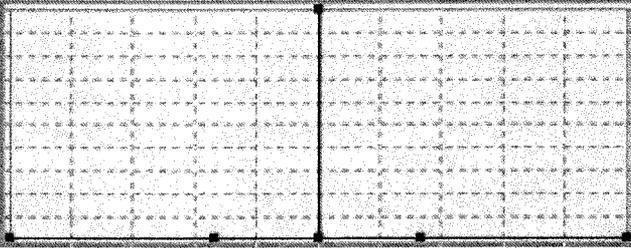
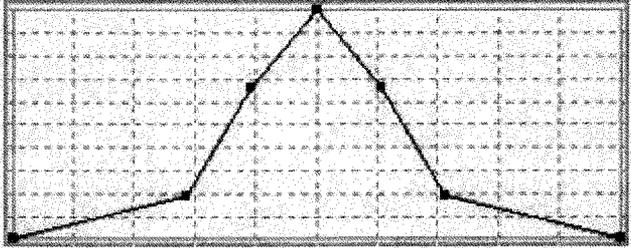
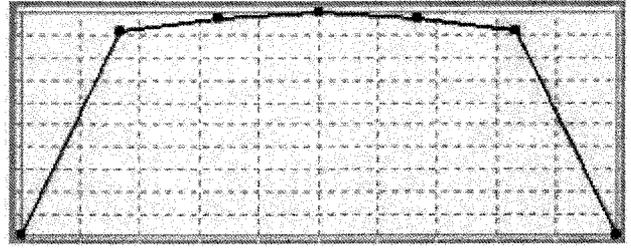
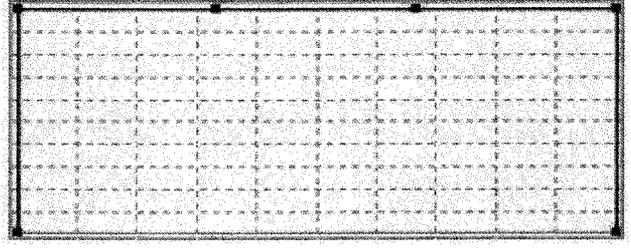


# 1 Fonction d'appartenance

Les courbes de fonction d'appartenance décrivent la manière dont eCognition calcule la valeur d'appartenance d'un objet à une classe thématique, pour une expression spécifique. Ces fonctions sont présentées au tableau F.1.

Tableau F.1 : Courbes de fonction d'appartenance utilisables dans eCognition

Dénomination de la courbe	Illustration
Plus grand que	 A graph on a grid showing a concave-up curve. The curve starts at the origin (0,0) and increases as it moves to the right, with its slope decreasing as it approaches a value of 1.0 at the right edge of the graph.
Plus petit que	 A graph on a grid showing a concave-down curve. The curve starts at a value of 1.0 at the left edge of the graph and decreases as it moves to the right, approaching a value of 0.0 at the right edge.
Plus grand que (booléen)	 A graph on a grid showing a Boolean membership function. The curve is at 0.0 for the entire range until a specific point, where it jumps vertically to 1.0 and remains at 1.0 for the rest of the range.
Plus petit que (booléen)	 A graph on a grid showing a Boolean membership function. The curve is at 1.0 for the entire range until a specific point, where it drops vertically to 0.0 and remains at 0.0 for the rest of the range.

Exact	
Approximatif gaussien	
Environ	
Complet	

## 2 Critères de décision

---

Les tableaux F.2 et F.3 contiennent toute l'information utilisée pour réaliser les classifications floues par objet dans eCognition. La colonne opérateur décrit de quelle façon la combinaison de critères est traitée. L'opérateur « et (min) » renvoie la valeur d'appartenance la plus faible des critères de décisions qui définissent une classe. Tous les critères doivent cependant dépasser un seuil minimum d'appartenance qui a été fixé ici à 11,5 % (valeur par défaut dans eCognition). Dans le cas contraire, une valeur d'appartenance nulle est associée à l'objet. L'opérateur « ou (max) » compare quant à lui les valeurs d'appartenance des critères et donne la plus élevée. Il suffit qu'un des critères dépasse le seuil minimum d'appartenance pour que l'opération soit valide. La colonne entité indique sur quelle propriété de l'image, les critères sont appliqués. Ainsi, le numéro de la bande (pour ASTER : 2, 3, 4, 6 et pour Landsat-7 : 3, 4, 5, 7), l'indice de végétation NDVI et la luminosité de l'ensemble des bandes (B pour brightness) sont toutes des entités mises à profit pour les classifications. Les colonnes borne gauche et borne droite font référence aux limites définies des courbes de tendances présentées précédemment dans la section 1. Enfin, il est à noter que le concept de relation de classe a été exploité lors de la classification de l'image ASTER pour définir l'appartenance de la classe thématique « Foin ». Ainsi, une pondération complémentaire au calcul de l'appartenance de l'objet à la classe « Forêt » est associée à la classe « Foin ».

## Landsat-7 ETM+

Tableau F.2 : Critères de décision appliqués lors de la classification floue par objet de l'image Landsat-7 ETM+ du 14 juillet 1999

Classes		Opérateur	Type condition	Entité	Borne gauche	Borne droite
Foret		et (min)	environ	3	4	5,1
	mixte	et (min)	environ	5	14,3	17,5
	conifères	et (min)	environ	5	11	14,7
Cultures						
	Prairies					
	Foin	et (min)	environ	5	17,5	22,5
	foin 1	et (min)	+ grand	3	5,8	6,1
	foin 2	et (min)	environ	NDVI	0,64	0,79
	Leg					
	leg2	et (min)	+ grand	B	17	18,5
			+ grand	4	39	45
	leg1	et (min)	+ grand (bool)	7	10	11
	Céréales					
	blé	et (min)	environ	3	4,8	5,6
			environ	5	13,9	14,9
	maïs	et (min)	environ	3	4,9	6,7
			environ	5	14,7	18,5
Zones urbaines		et (min)	environ	4	20	31
			complet	7	8,25	10,4
Eau		et (min)	+ petit	B	3	4,5
			+ petit (bool)	NDVI	0,3	0,5

## ASTER

Tableau F.3 : Critères de décision appliqués lors de la classification floue par objet de l'image ASTER du 23 juin 2000

Classes	Opérateur	Type condition	Entité	Borne gauche	Borne droite
Foret	ou (max)	plus petit	2	4,2	4,9
		plus petit	6	8,5	9
mixte	et (min)	environ	4	17,3	22
conifères	et (min)	environ	4	14	17,5
Cultures:					
Prairies					
Foin	et (min)	relation de classe	pas Foret		
foin 1	et (min)	plus grand	4	27	28
		plus grand	6	14,5	15,5
foin 2	et (min)	plus grand	3	33	34
		environ	4	17	21,5
Leg					
leg2	et (min)	environ	B	17,5	21,5
		environ	4	22,5	28
leg1	et (min)	environ	2	5,5	7
		environ	6	11	13
Céréales					
blé	et (min)	environ	B	14,8	16,9
		environ	2	5,5	7,2
maïs	et (min)	environ	2	7,7	11,5
		environ	4	16	23
Zones urbaines	et (min)	environ	B	15,5	17,2
		environ	2	6,9	9,5
Eau	et (min)	plus petit	B	11,75	12,5
		plus petit	4	13,75	14,5



**ANNEXE G**  
**Indices de qualité**



# 1 Indices de qualité

---

## Matrice de confusion

La matrice de confusion est un tableau à double entrée ou autrement dit, une table de contingence. Les lignes révèlent les résultats par rapport aux différentes classes thématiques définies dans l'image classée. Les colonnes dévoilent les résultats selon les zones de références établies qui servent à vérifier la qualité de la classification (zone de validation). La cellule de croisement dans la matrice exprime donc le nombre de pixel appartenant à la classe  $i$  et affectés à la classe  $j$ . Dans le cas où  $i = j$ , les cellules indiquent le nombre de pixels correctement affectés.

## Indice de précision moyenne

L'indice de précision moyenne ( $G$ ) exprime globalement le résultat de la classification. Il s'agit du rapport de la somme des pixels correctement classés sur l'ensemble des pixels classés. Cet indice ne prend pas en compte les pixels non classés. Il exprime ainsi les erreurs de commission, c'est-à-dire les pixels bien classés par rapport aux pixels mal classés.

$$G = \frac{\sum m(i,i)}{T_{classées}}$$

où  $T_{classés}$  = total des pixels classés  
 $m(i,i)$  = pixels de la classe  $i$   
correctement classés

## Indice Kappa

L'indice Kappa ( $K$ ) a été proposé par Cohen en 1960. Il est maintenant devenu l'indice le plus connu pour l'évaluation de la qualité d'une classification. Il est similaire à l'indice de précision moyenne du fait qu'il est principalement affecté par les erreurs de commission. L'avantage d'utiliser cet indice réside dans le fait qu'il est largement utilisé dans la littérature et il facilite donc les comparaisons. Cependant, un des inconvénients majeur de l'indice Kappa est de surestimer la qualité des résultats d'une classification étant donné qu'il ne tient pas compte des pixels non classés.

$$K = \frac{(T_{classés}) \sum m(i,i) - \sum [m(i,+) \cdot m(+,i)]}{(T_{classés})^2 - \sum [m(i,+) \cdot m(+,i)]}$$

où  $T_{classés}$  = total des pixels classés

$m(i,i)$  = pixels de la classe  $i$   
correctement classés

$m(i,+)$  = valeur marginale de la  
ligne  $i$  (somme de la ligne)

$m(+,i)$  = total des pixels classés  
devant appartenir à la classe  $i$

## **ANNEXE H**

**Bases de données agroenvironnementales**



# 1 Bases de données agroenvironnementales

## Base de données originale

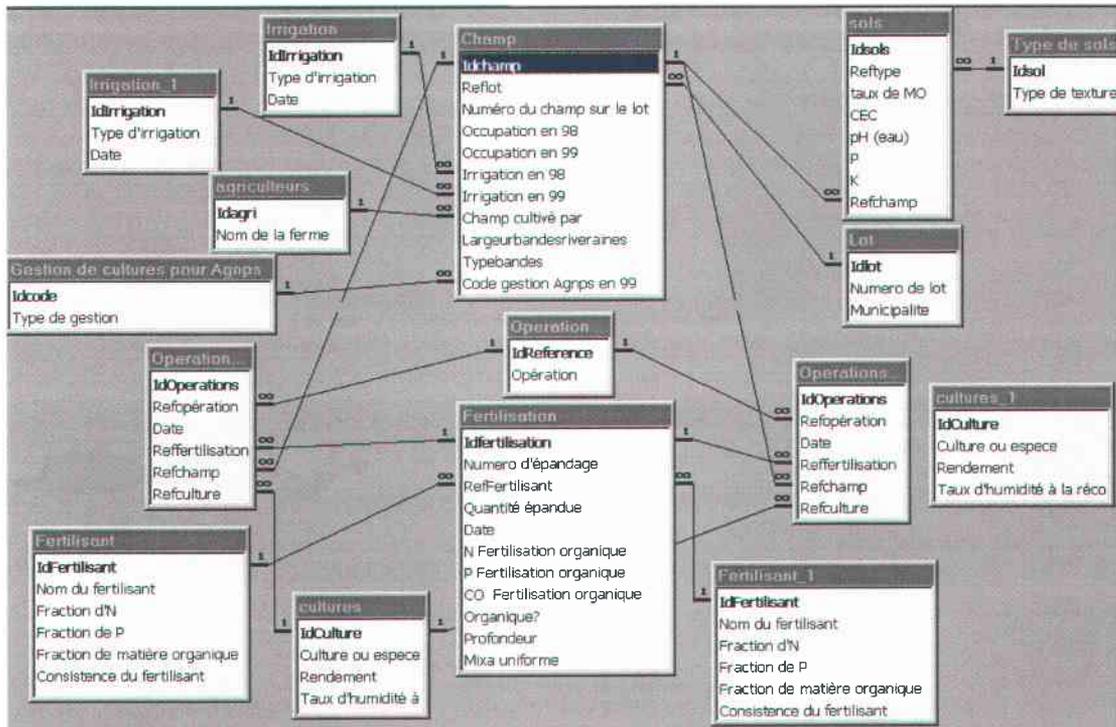


Figure H.1 : Structure de la base de données agroenvironnementale originale

## Nouvelle base de données

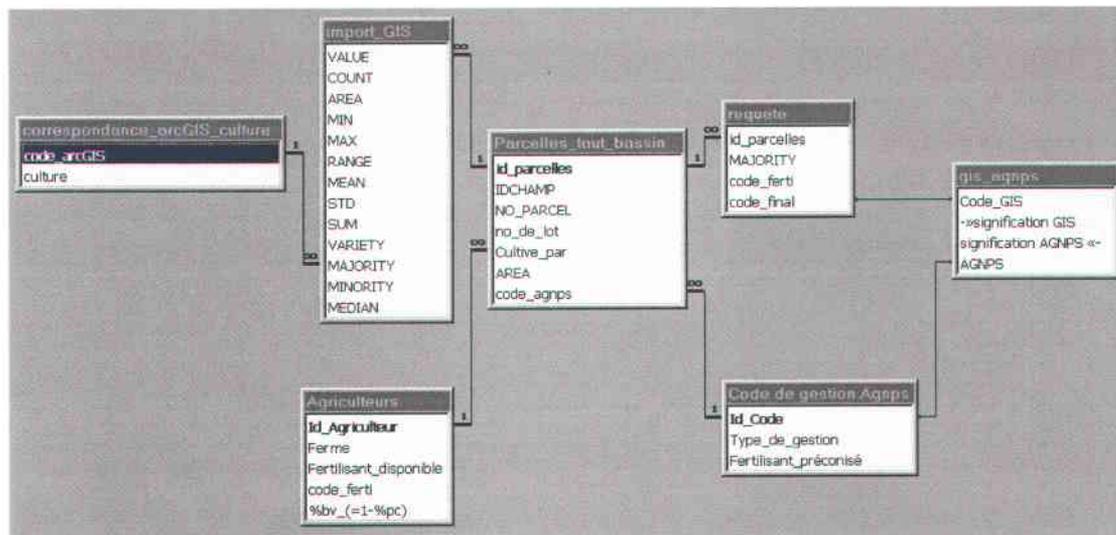
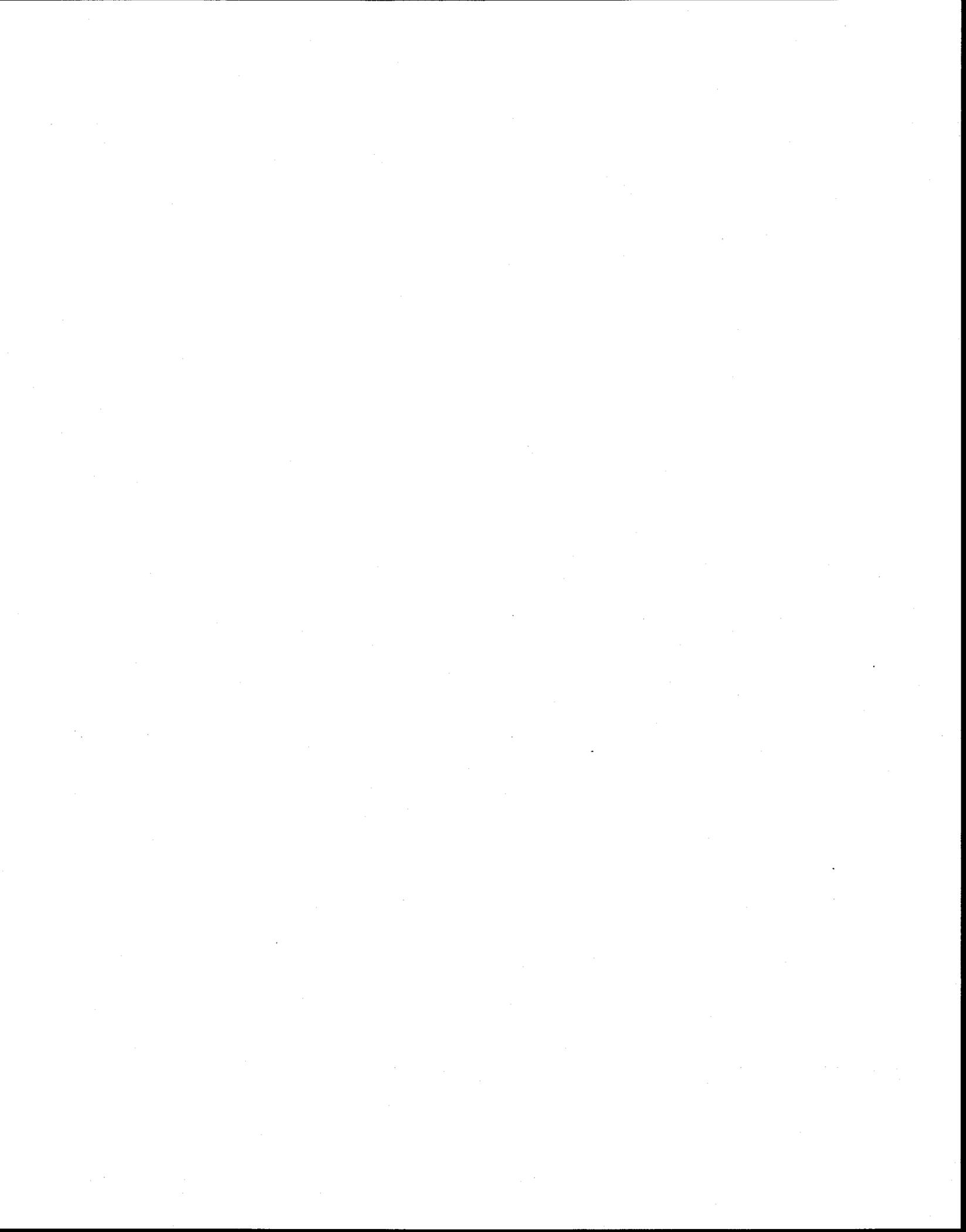


Figure H.2 : Structure de la nouvelle base de données agroenvironnementale



## **ANNEXE I**

**Fichier vectoriel des cellules AnnAGNPS**



# 1 Fichier vectoriel des cellules AnnAGNPS

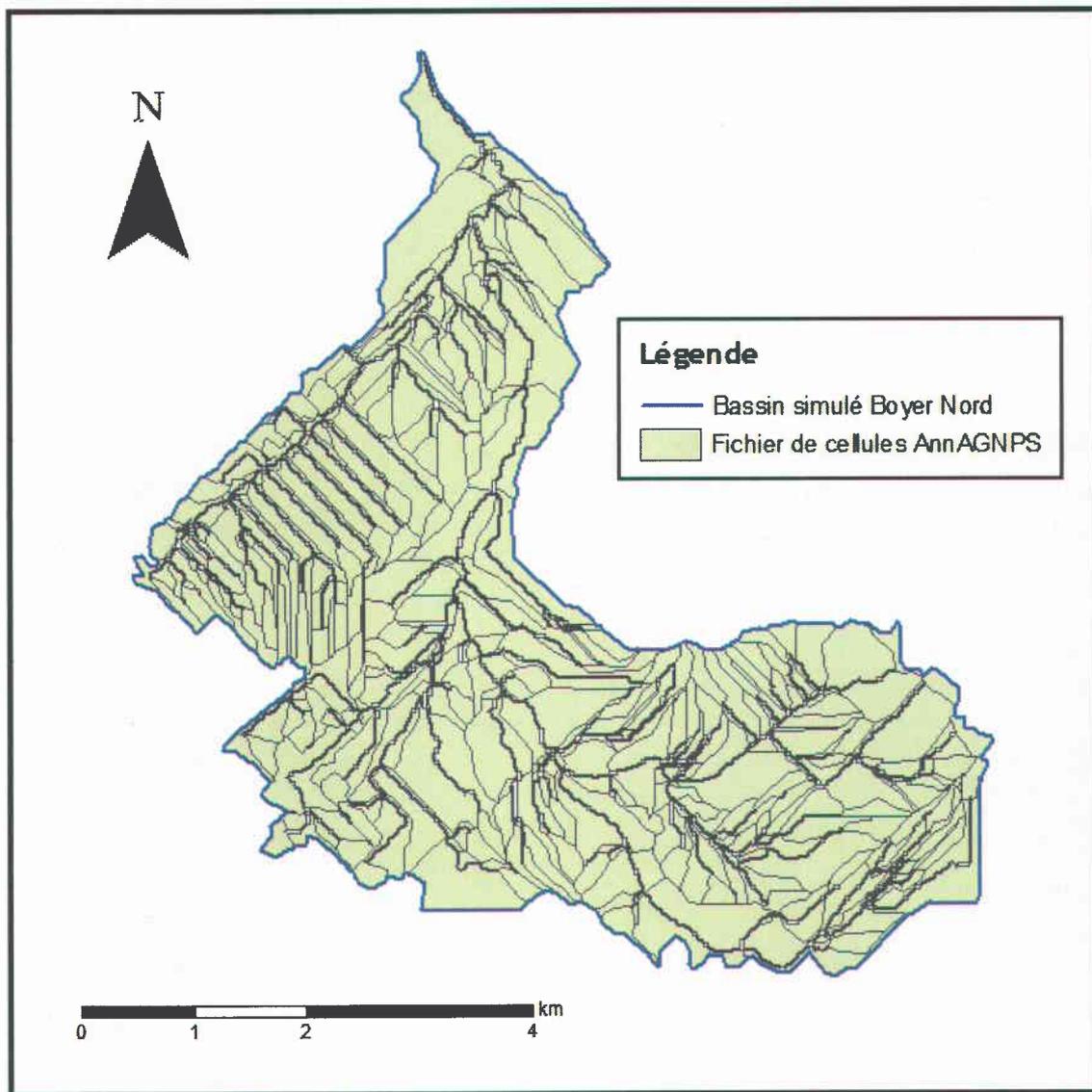
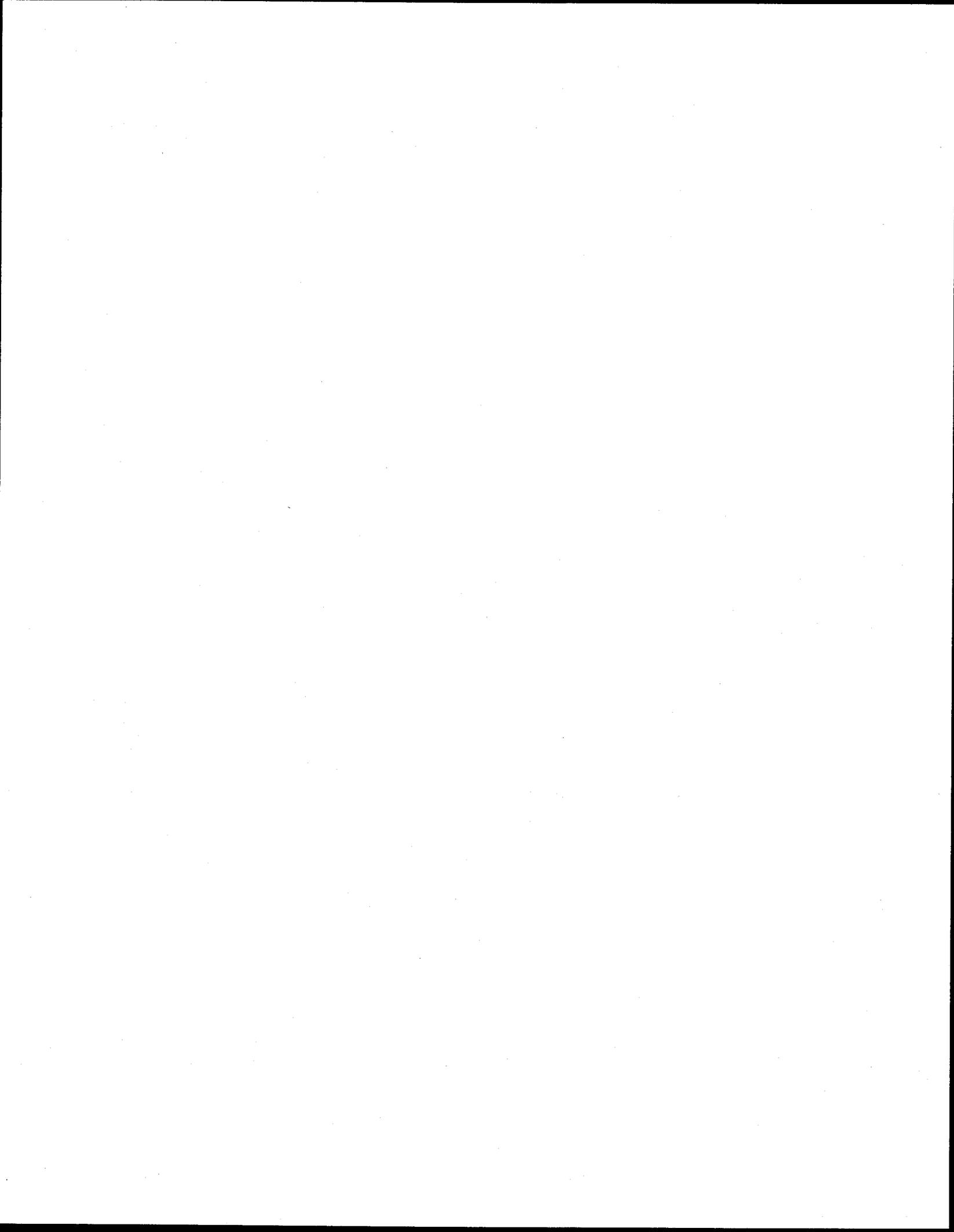


Figure I.1 : Bassin simulé de la Boyer Nord découpé selon les cellules AnnAGNPS



## **ANNEXE J**

### **Tables de correspondance**



# 1 Table de correspondance pour établir les nouveaux codes de gestion AGNPS

Tableau J.1 : Table permettant de transférer les codes SIG en codes de gestion AGNPS

Codes SIG	→ Signification SIG	Signification AGNPS ←	Codes de gestion AGNPS
0	Inconnu (bv)	Inconnu	19
1	Forêt (bv)	Forêt	17
6	Blé (bv)	Blé	2
8	Zones urbaines (bv)	Zones urbaines	18
9	Maïs (bv)	Maïs grain 1 bv	8
10	Eau (bv)	Inconnu	19
15	Prairies (bv)	Foin bv	5
100	Forêt (pc)	Forêt	17
600	Blé (pc)	Blé	2
800	Zones urbaines (pc)	Zones urbaines	18
900	Maïs (pc)	Mias grain 1 pc	9
1000	Eau (pc)	Inconnu	19
1500	Prairies (pc)	Foin pc	6

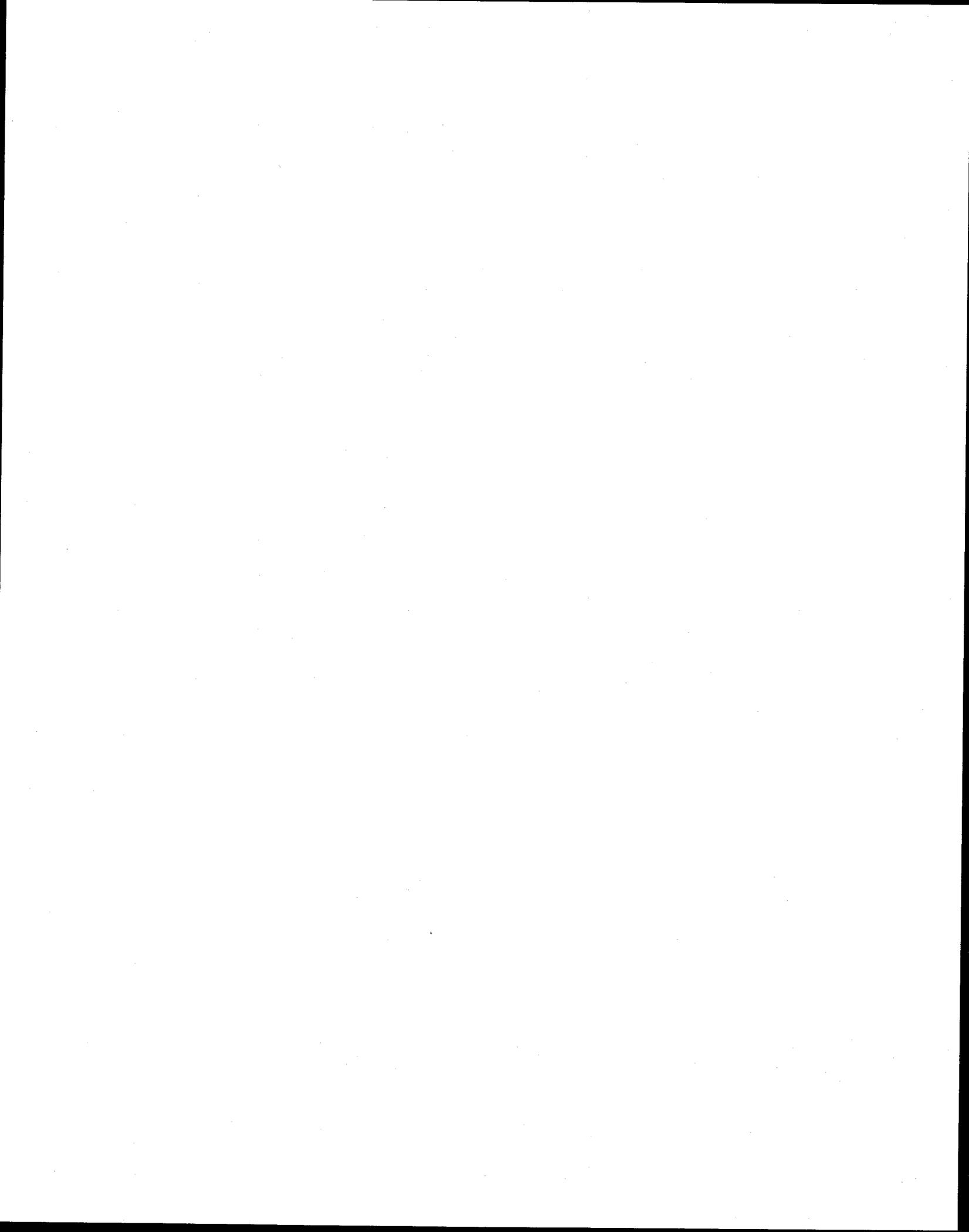
## 2 Table de correspondance pour la reclassification du fichier de cellules original

Tableau J.2 : Table permettant de reclassifier les codes de gestion AGNPS du fichier de cellules original pour qu'ils correspondent au fichier de cellules issu de la classification

Codes de gestion AGNPS originaux	→ Signification originale	Signification reclassifiée←	Codes de gestion AGNPS reclassifiés
1	Avoine	Inconnu	19
2	Blé	Blé	2
5	Foin bv	Foin bv	5
6	Foin pc	Foin pc	6
7	Maïs ensilage	Maïs bv	8
8	Maïs grain 1 bv	Maïs bv	8
9	Maïs grain 1 pc	Maïs pc	9
10	Maïs grain 2 bv	Maïs bv	8
11	Maïs grain 2 pc	Maïs pc	9
12	Maïs grain 3	Maïs bv	8
13	Paturage bv	Foin bv	5
15	Orge	Inconnu	19
16	Foin ss epandage	Foin bv	5
17	Forêt	Forêt	17
18	Zones urbaines	Zones urbaines	18
19	Inconnu	Inconnu	19

## **ANNEXE K**

**Fichier d'édition et applications VB**



# 1 Structure du fichier de l'éditeur d'AnnAGNPS

```

QC_Boyer_Nord_Watershed.inp - Notepad
File Edit Search Help
AnnAGNPS: Version 2.2          1      1      1

WATERSHED DATA:
Bassin de la Boyer-Nord
Bassin Boyer-Nord (exutoire STA 008 du MEF), NetP DEFAULT          46.41      71.

Simulation Period Data:
  1 11998 12 311999          1      1125.      1064.      401          2
    ON                      2
    EI PCT:                 0.      0.      0.      0.      0.      3.
                        6.      11.      16.      20.5      25.      32.5
                        40.      49.5      59.      67.      75.      80.5
                        86.      90.      94.      96.5      99.      99.5

Cell Data:
code AnnAGNPS
22 2 (17) 2 464 1 6.56 86.
    .12156 249. 2.764
    .11605 95.
    .01024 50. .02361 50.
23 4 (15) 2 1 30.08 91.
    .03636 36. .857
    .01637 907.
    .00461 50. .01042 50.
32 1 (17) 3 1 12.08 97.
    .03851 290. .815
    .01770 966.
    .00541 50. .00707 50.
33 1 (17) 3 1 4.04 94.
  
```

Figure K.1 : Structure du fichier créé par l'éditeur d'AnnAGNPS (AnnAGNPS Input Editor) (les codes de gestion AGNPS sont encerclés en rouge)

## 2 Code de l'application Visual Basic de transfert

Cette application développée en langage Visual Basic permet la transposition des codes de gestion AnnAGNPS dérivés des classifications dans le fichier de l'éditeur AnnAGNPS. Les lignes de codes du programme sont exposées ci-bas.

```

Private Sub cmdConver_Click()

Dim strInp As String
Dim strNewF As String
Dim strNewCode As String
Dim strTemp As String
Dim strAGNPS As String
Dim intN As Integer
Dim intQuatre As Integer
Dim strCode As String
Dim strLine As String
Dim strDebut As String
Dim strFin As String

If txtDepart.Text = "" Or txtCodes.Text = "" Or txtSortie.Text = "" Then
    intErr = MsgBox("Vous devez spécifier un nom pour chaque fichier nécessaire au transfert!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Else
    strNewF = DirDossier.Path & "\" & txtCodes.Text & ".txt"
    strInp = DirDossier.Path & "\" & txtDepart.Text & ".inp"
    strAGNPS = DirDossier.Path & "\" & txtSortie.Text & ".inp"

    Open strInp For Input As #1
    Open strNewF For Input As #2
    Open strAGNPS For Output As #3

    intN = 1

    Do While intN < 17
        Line Input #1, strTemp
        Print #3, strTemp
        intN = intN + 1
    Loop
    intQuatre = 4
    Do While Not EOF(2)
        If intQuatre = 4 Then
            Line Input #1, strLine
            strDebut = Mid$(strLine, 1, 20)
            Input #2, strCode
            strTrans = RTrim$(strCode)
            strFin = Mid$(strLine, 23)

            If Len(strTrans) = 1 Then
                Print #3, strDebut & strTrans & " " & strFin
            Else
                Print #3, strDebut & strTrans & strFin
                End If
                intQuatre = 1
            Else
                Line Input #1, strTemp
                Print #3, strTemp
                intQuatre = intQuatre + 1
            End If
            intN = intN + 1
        Loop
        Do While intN > 491 And Not EOF(1)
            Line Input #1, strTemp
            Print #3, strTemp
            intN = intN + 1
        Loop
        Close #1
        Close #2
        Close #3
    End If
End Sub

Private Sub cmdQuit_Click()
    End
End Sub

Private Sub drvDisque_Change()
    ChDir ("c:\")
    ChDrive drvDisque.Drive
    DirDossier.Path = drvDisque.Drive
End Sub

```

### 3 Code de l'application Visual Basic de mise en forme des résultats

Cette application développée en langage Visual Basic permet l'extraction et la mise en forme des résultats recherchés pour la création des cartes et graphiques servant à l'analyse des simulations. Les lignes de codes du programme sont présentés dans ce qui suit.

```

Public strFichier As String
Public strTitrefichier As String

Private Sub cmdQuit_Click()
End
End Sub

Private Sub cmdTransform_Click()
Dim strRunoff As String
Dim strRunoffTemp As String
Dim strArgileTemp As String
Dim strArgile As String
Dim strSableTemp As String
Dim strSable As String
Dim strLimonTemp As String
Dim strLimon As String
Dim strNsed As String
Dim strNsol As String
Dim strNsedTemp As String
Dim strNsolTemp As String
Dim strPsed As String
Dim strPsol As String
Dim strPsedTemp As String
Dim strPsolTemp As String
Dim strTemp As String
Dim strARCVa As String
Dim strARCVb As String
Dim strARCVc As String
Dim strARCVd As String
Dim strAGNPS As String
Dim strFileTemp As String
Dim strDate As String
Dim strDebutD As String
Dim strFinD As String
Dim strFin As String
Dim strTronc As String
Dim strTroncTemp As String
Dim strOccupsol As String
Dim strOccupsolTemp As String
Dim strCelTemp As String
Dim strCel As String
Dim strAire As String
Dim strAireTemp As String

Dim intN As Long
Dim intM As Long

Dim dblArgile As Double
Dim dblLimon As Double
Dim dblSable As Double
Dim dblArgileTemp As Double
Dim dblLimonTemp As Double
Dim dblSableTemp As Double
Dim dblNsed As Double
Dim dblNsol As Double
Dim dblNsedTemp As Double
Dim dblNsolTemp As Double
Dim dblPsed As Double
Dim dblPsol As Double
Dim dblPsedTemp As Double
Dim dblPsolTemp As Double

'Assignation et création du fichier temporaire
strAGNPS = strFichier
strFileTemp = "Temp_" & strTitrefichier & ".txt"

If strAGNPS = "" Then
intErr = MsgBox("Vous devez choisir un fichier à transformer!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Else
If optTroncons.Value = True Then
*****
*
* Remise en forme du fichier AGNPS Event(troncons) dans un format sans sous-titres *
*
*****
Open strAGNPS For Input As #1
Open strFileTemp For Output As #2

intN = 1

```

```

'Lire et ecrire entete du fichier
Do While intN <= 5
  Line Input #1, strTemp
  Print #2, strTemp
  intN = intN + 1
Loop

'Boucle pour mettre en forme H2O
intM = 1
Do While intN < 9919
  If intM <= 6 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 55 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS1
intM = 1
Do While intN >= 9919 And intN < 38232
  If intM <= 4 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 59 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme Outlet de SS1
intM = 5
Do While intN >= 38232 And intN < 38306
  If intM <= 4 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 51 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS2
intM = 1
Do While intN >= 38306 And intN < 47796
  If intM <= 4 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 55 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme Outlet de SS2
intM = 5
Do While intN >= 47796 And intN < 47823
  If intM <= 4 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 18 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS3
intM = 1
Do While intN >= 47823 And intN < 57313
  If intM <= 4 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  ElseIf intM = 55 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme Outlet de SS3
intM = 5
Do While intN >= 57313 And intN < 57340

```

```

If intM <= 4 Then
  Line Input #1, strTemp
  intM = intM + 1
  intN = intN + 1
Elseif intM = 18 Then
  intM = 1
Else
  Line Input #1, strTemp
  Print #2, strTemp
  intM = intM + 1
  intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme N
intM = 1
Do While intN >= 57340 And intN < 62216
  If intM <= 5 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  Elseif intM = 54 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme P
intM = 1
Do While intN >= 62216 And intN < 67092
  If intM <= 5 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  Elseif intM = 54 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme C
intM = 1
Do While intN >= 67092 And Not EOF(1)
  If intM <= 5 Then
    Line Input #1, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  Elseif intM = 54 Then
    intM = 1
  Else
    Line Input #1, strTemp
    Print #2, strTemp
    intM = intM + 1
    intN = intN + 1
  End If
Loop

Close #1
Close #2

.....
*
* Transfert des informations concernant uniquement le tronçon 1 dans un nouveau fichier *
*
.....

Vérification que c'est bien le tronçon 1 qui est demandé
If optTroncEx.Value = True Then

  strARCvA = "Arcview_Ta_" & strTitrefichier & ".txt"

  Open strFileTemp For Input As #3
  Open strARCvA For Output As #4

  intN = 1

  'Lire et ecrire entete du fichier
  Do While intN <= 5
    Line Input #3, strTemp
    Print #4, strTemp
    intN = intN + 1
  Loop

  Do While Not EOF(3)
    'Chercher les informations pour H2O et les copier
    If intN >= 8746 And intN <= 8790 Then
      If chkH2O.Value = 1 Then
        If intN Mod 2 = 0 Then
          Line Input #3, strLine
          strDate = Mid$(strLine, 14, 8)
          strRunoffTemp = Mid$(strLine, 50, 10)
          strRunoff = LTrim$(strRunoffTemp)
          Print #4, strDate & ";" & strRunoff
          intN = intN + 1
        Else
          Line Input #3, strTemp
          intN = intN + 1
        End If
      Else
        Line Input #3, strTemp
        intN = intN + 1
      End If
    Else
      Line Input #3, strTemp
      intN = intN + 1
    End If
  'Chercher les informations pour SS et les copier
  Elseif intN >= 35035 And intN <= 35172 Then

```

```

If chkSS.Value = 1 Then
  If intN Mod (2) = 1 Then
    Line Input #3, strTemp
    Line Input #3, strTemp
    Line Input #3, strTemp
    Line Input #3, strTemp
    Line Input #3, strLine
    strDate = Mid$(strLine, 13, 8)
    strArgileTemp = Mid$(strLine, 38, 10)
    strArgile = LTrim$(strArgileTemp)
    strLimonTemp = Mid$(strLine, 48, 9)
    strLimon = LTrim$(strLimonTemp)
    strSableTemp = Mid$(strLine, 57, 9)
    strSable = LTrim$(strSableTemp)
    Print #4, strDate & ";" & strArgile & ";" & strLimon & ";" & strSable
    intN = intN + 5
  Else
    Line Input #3, strTemp
    intN = intN + 1
  End If
Else
  Line Input #3, strTemp
  intN = intN + 1
End If
'Chercher les informations pour N et les copier
Elseif intN >= 57230 And intN <= 57252 Then
  If chkN.Value = 1 Then
    Line Input #3, strLine
    strDate = Mid$(strLine, 13, 8)
    strNsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
    strNsed = LTrim$(strNsedTemp)
    strNsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
    strNsol = LTrim$(strNsolTemp)
    Print #4, strDate & ";" & strNsed & ";" & strNsol
    intN = intN + 1
  Else
    Line Input #3, strTemp
    intN = intN + 1
  End If
'Chercher les informations pour P et les copier
Elseif intN >= 61646 And intN <= 61668 Then
  If chkP.Value = 1 Then
    Line Input #3, strLine
    strDate = Mid$(strLine, 13, 8)
    strPsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
    strPsed = LTrim$(strPsedTemp)
    strPsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
    strPsol = LTrim$(strPsolTemp)
    Print #4, strDate & ";" & strPsed & ";" & strPsol
    intN = intN + 1
  Else
    Line Input #3, strTemp
    intN = intN + 1
  End If
'Lire le reste du fichier
Else
  Line Input #3, strTemp
  intN = intN + 1
End If
Loop
If chkH2O.Value = 0 And chkSS.Value = 0 And chkN.Value = 0 And chkP.Value = 0 Then
  intErr = MsgBox("Vous devez choisir les informations que vous désirez!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Else
  intErr = MsgBox("Transformation terminée!", vbOKOnly + vbExclamation, "Succès!")
End If

End If

Close #3
Close #4

*****
*                               *
* Transfert des informations concernant tous les tronçons dans un nouveau fichier *
*                               *
*****

Vérification que c'est bien tous les tronçons qui sont demandés
If optTroncsTot.Value = True Then

  strARCVb = "Arcview_Tb_" & strTitrefichier & ".txt"

  Open strFileTemp For Input As #5
  Open strARCVb For Output As #6

  intN = 1

  'Lire et écrire entete du fichier
  Do While intN <= 5
    Line Input #5, strTemp
    Print #6, strTemp
    intN = intN + 1
  Loop

  Do While Not EOF(5)
    'Chercher les informations pour les SS et les copier
    Do While intN >= 8815 And intN <= 35034
      If chkSS.Value = 1 Then
        intM = 1
        dblArgile = 0
        dblArgileTemp = 0
        dblLimon = 0
        dblLimonTemp = 0
        dblSable = 0
        dblSableTemp = 0
        Do While intM <= 137
          If intN Mod (2) = 1 Then
            If intM = 1 Then
              Line Input #5, strLine
              strTroncTemp = Left$(strLine, 4)
              strTronc = RTrim$(strTroncTemp)
              Line Input #5, strTemp
              Line Input #5, strTemp
            End If
          End If
          intM = intM + 1
        Loop
      End If
    Loop
  Loop
End If

```

```

Line Input #5, strTemp
Line Input #5, strLine
strArgileTemp = Mid$(strLine, 38, 10)
strArgile = LTrim$(strArgileTemp)
dblArgileTemp = Val(strArgile)
dblArgile = dblArgile + dblArgileTemp
strLimonTemp = Mid$(strLine, 48, 9)
strLimon = LTrim$(strLimonTemp)
dblLimonTemp = Val(strLimon)
dblLimon = dblLimon + dblLimonTemp
strSableTemp = Mid$(strLine, 57, 9)
strSable = LTrim$(strSableTemp)
dblSableTemp = Val(strSable)
dblSable = dblSable + dblSableTemp
intN = intN + 5
intM = intM + 5
Else
Line Input #5, strTemp
Line Input #5, strTemp
Line Input #5, strTemp
Line Input #5, strTemp
Line Input #5, strLine
strArgileTemp = Mid$(strLine, 38, 10)
strArgile = LTrim$(strArgileTemp)
dblArgileTemp = Val(strArgile)
dblArgile = dblArgile + dblArgileTemp
strLimonTemp = Mid$(strLine, 48, 9)
strLimon = LTrim$(strLimonTemp)
dblLimonTemp = Val(strLimon)
dblLimon = dblLimon + dblLimonTemp
strSableTemp = Mid$(strLine, 57, 9)
strSable = LTrim$(strSableTemp)
dblSableTemp = Val(strSable)
dblSable = dblSable + dblSableTemp
intN = intN + 5
intM = intM + 5
End If
Else
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
intM = intM + 1
End If
Loop
strArgile = CStr(dblArgile)
strLimon = CStr(dblLimon)
strSable = CStr(dblSable)
Print #6, strTronc & ";" & strArgile & ";" & strLimon & ";" & strSable
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
Else
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
End If
Loop
'Chercher les informations pour N et les copier
Do While intN >= 52860 And intN <= 57229
If chkN.Value = 1 Then
intM = 1
dblNsed = 0
dblNsedTemp = 0
dblNsol = 0
dblNsolTemp = 0
Do While intM <= 23
If intM = 1 Then
Line Input #5, strLine
strTroncTemp = Left$(strLine, 4)
strTronc = RTrim$(strTroncTemp)
strNsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
strNsed = LTrim$(strNsedTemp)
dblNsedTemp = Val(strNsed)
dblNsed = dblNsed + dblNsedTemp
strNsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
strNsol = LTrim$(strNsolTemp)
dblNsolTemp = Val(strNsol)
dblNsol = dblNsol + dblNsolTemp
intN = intN + 1
intM = intM + 1
Else
Line Input #5, strLine
strNsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
strNsed = LTrim$(strNsedTemp)
dblNsedTemp = Val(strNsed)
dblNsed = dblNsed + dblNsedTemp
strNsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
strNsol = LTrim$(strNsolTemp)
dblNsolTemp = Val(strNsol)
dblNsol = dblNsol + dblNsolTemp
intN = intN + 1
intM = intM + 1
End If
Loop
strNsed = CStr(dblNsed)
strNsol = CStr(dblNsol)
Print #6, strTronc & ";" & strNsed & ";" & strNsol
Else
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
End If
Loop
'Chercher les informations pour P et les copier
Do While intN >= 57276 And intN <= 61645
If chkP.Value = 1 Then
intM = 1
dblPsed = 0
dblPsedTemp = 0
dblPsol = 0
dblPsolTemp = 0
Do While intM <= 23
If intM = 1 Then
Line Input #5, strLine

```

```

strTroncTemp = Left$(strLine, 4)
strTronc = RTrim$(strTroncTemp)
strPsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
strPsed = LTrim$(strPsedTemp)
dblPsedTemp = Val(strPsedTemp)
dblPsed = dblPsed + dblPsedTemp
strPsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
strPsol = LTrim$(strPsolTemp)
dblPsolTemp = Val(strPsolTemp)
dblPsol = dblPsol + dblPsolTemp
intN = intN + 1
intM = intM + 1
Else
Line Input #5, strLine
strPsedTemp = Mid$(strLine, 21, 12)
strPsed = LTrim$(strPsedTemp)
dblPsedTemp = Val(strPsedTemp)
dblPsed = dblPsed + dblPsedTemp
strPsolTemp = Mid$(strLine, 33, 11)
strPsol = LTrim$(strPsolTemp)
dblPsolTemp = Val(strPsolTemp)
dblPsol = dblPsol + dblPsolTemp
intN = intN + 1
intM = intM + 1
End If
Loop
strPsed = CStr(dblPsed)
strPsol = CStr(dblPsol)
Print #6, strTronc & ";" & strPsed & ";" & strPsol
Else
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
End If
Loop
'Lire le reste du fichier
Line Input #5, strTemp
intN = intN + 1
Loop

If chkH2O.Value = 1 Then
intErr = MsgBox("Vous ne pouvez obtenir d'information concernant H2O", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Elseif chkSS.Value = 0 And chkN.Value = 0 And chkP.Value = 0 Then
intErr = MsgBox("Vous devez choisir les informations que vous désirez!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Else
intErr = MsgBox("Transformation terminée!", vbOKOnly + vbExclamation, "Succès!")
End If

End If
Close #5
Close #6

Elseif optCellules.Value = True Then
If optFileDat.Value = True Then
.....
* Remise en forme du fichier AGNPS Tracking(cellules) dans un format sans sous-titres *
.....
Open strAGNPS For Input As #7
Open strFileTemp For Output As #8

intN = 1

'Lire et écrire entete du fichier
Do While intN <= 5
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intN = intN + 1
Loop

'Boucle pour mettre en forme H2O accumulated output
intM = 1
Do While intN >= 6 And intN < 12
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme H2O ratio output
intM = 1
Do While intN >= 12 And intN < 1020
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 53 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS C&S accumulated output
intM = 1
Do While intN >= 1020 And intN < 1030
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Else
Line Input #7, strTemp

```

```

Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS C&S ratio output
intM = 1
Do While intN >= 1030 And intN < 2114
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 29 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS C&S mass output
intM = 1
Do While intN >= 2114 And intN < 3198
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 29 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS C accumulated output
intM = 1
Do While intN >= 3198 And intN < 3204
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS C ratio output
intM = 1
Do While intN >= 3204 And intN < 4212
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 52 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS S accumulated output
intM = 1
Do While intN >= 4212 And intN < 4218
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme SS S ratio output
intM = 1
Do While intN >= 4218 And intN < 5226
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 52 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme Nutrient accumulated output
intM = 1
Do While intN >= 5226 And intN < 5232
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Else

```

```

Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
Loop

'Boucle pour mettre en forme Nutrient ratio output
intM = 1
Do While intN >= 5232 And Not EOF(7)
If intM <= 4 Then
Line Input #7, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
Elseif intM = 53 Then
intM = 1
Else
Line Input #7, strTemp
Print #8, strTemp
intM = intM + 1
intN = intN + 1
End If
End If
Loop

Close #7
Close #8

*****
*
* Transfert des informations concernant les cellules dans un nouveau fichier
*
*****
strARCVc = "Arcview_C_" & strTitrefichier & ".txt"

Open strFileTemp For Input As #9
Open strARCVc For Output As #10

intN = 1

'Lire et écrire entete du fichier
Do While intN <= 5
Line Input #9, strTemp
Print #10, strTemp
intN = intN + 1
Loop

Do While Not EOF(9)
Chercher les informations pour N et P et les copier
Do While intN >= 4660 And Not EOF(9)
If chkCN.Value = 1 And chkCP.Value = 0 Then
If intN Mod (2) = 0 Then
Line Input #9, strLine
strCelTemp = Left$(strLine, 5)
strCel = RTrim$(strCelTemp)
strOccupsolTemp = Mid$(strLine, 24, 9)
strOccupsol = RTrim$(strOccupsolTemp)
strNsedTemp = Mid$(strLine, 34, 8)
strNsed = LTrim$(strNsedTemp)
strNsolTemp = Mid$(strLine, 42, 8)
strNsol = LTrim$(strNsolTemp)
intN = intN + 1
Print #10, strCel & ";" & strOccupsol & ";" & strNsed & ";" & strNsol
Else
Line Input #9, strTemp
intN = intN + 1
End If
Elseif chkCP.Value = 1 And chkCN.Value = 0 Then
If intN Mod (2) = 0 Then
Line Input #9, strLine
strCelTemp = Left$(strLine, 5)
strCel = RTrim$(strCelTemp)
strOccupsolTemp = Mid$(strLine, 24, 9)
strOccupsol = RTrim$(strOccupsolTemp)
strPsedTemp = Mid$(strLine, 66, 8)
strPsed = LTrim$(strPsedTemp)
strPsolTemp = Mid$(strLine, 74, 8)
strPsol = LTrim$(strPsolTemp)
intN = intN + 1
Print #10, strCel & ";" & strOccupsol & ";" & strPsed & ";" & strPsol
Else
Line Input #9, strTemp
intN = intN + 1
End If
Elseif chkCP.Value = 1 And chkCN.Value = 1 Then
If intN Mod (2) = 0 Then
Line Input #9, strLine
strCelTemp = Left$(strLine, 5)
strCel = RTrim$(strCelTemp)
strOccupsolTemp = Mid$(strLine, 24, 9)
strOccupsol = RTrim$(strOccupsolTemp)
strNsedTemp = Mid$(strLine, 34, 8)
strNsed = LTrim$(strNsedTemp)
strNsolTemp = Mid$(strLine, 42, 8)
strNsol = LTrim$(strNsolTemp)
strPsedTemp = Mid$(strLine, 66, 8)
strPsed = LTrim$(strPsedTemp)
strPsolTemp = Mid$(strLine, 74, 8)
strPsol = LTrim$(strPsolTemp)
intN = intN + 1
Print #10, strCel & ";" & strOccupsol & ";" & strNsed & ";" & strNsol & ";" & strPsed & ";" & strPsol
Else
Line Input #9, strTemp
intN = intN + 1
End If
End If
Loop

'Lire le reste du fichier
If Not EOF(9) Then
Line Input #9, strTemp
intN = intN + 1
End If
Loop

```

```

If chkCN.Value = 0 And chkCP.Value = 0 Then
    intErr = MsgBox("Vous devez choisir les informations que vous désirez!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
Else
    intErr = MsgBox("Transformation terminée!", vbOKOnly + vbExclamation, "Succès!")
End If

Close #9
Close #10

Elseif optFileDoc.Value = True Then
    .....
    " Remise en forme du fichier SAA_AA.doc(cellules) dans un format sans sous-titres
    .....
    strARCVd = "Arcview_Css_" & strTitrefichier & ".txt"

    Open strAGNPS For Input As #11
    Open strARCVd For Output As #12

    intN = 1

    Do While Not EOF(11)
        ' Chercher les informations pour SS yield
        Do While intN >= 6607 And intN < 8462
            If chkCSSy.Value = 1 Then
                Line Input #11, strLine
                strCelTemp = Left$(strLine, 5)
                strCel = RTrim$(strCelTemp)
                strAireTemp = Mid$(strLine, 15, 6)
                strAire = LTrim$(strAireTemp)
                Line Input #11, strTemp
                Line Input #11, strLine
                strArgileTemp = Mid$(strLine, 32, 12)
                strArgile = LTrim$(strArgileTemp)
                strLimonTemp = Mid$(strLine, 44, 12)
                strLimon = LTrim$(strLimonTemp)
                strSableTemp = Mid$(strLine, 56, 12)
                strSable = LTrim$(strSableTemp)
                Print #12, strCel & ";" & strAire & ";" & strArgile & ";" & strLimon & ";" & strSable
                Line Input #11, strTemp
                intN = intN + 4
            Else
                Line Input #11, strTemp
                intN = intN + 1
            End If
        Loop
        Do While intN >= 11759 And intN < 15006
            If chkCSSL.Value = 1 Then
                Line Input #11, strLine
                strCelTemp = Left$(strLine, 5)
                strCel = RTrim$(strCelTemp)
                strAireTemp = Mid$(strLine, 15, 6)
                strAire = LTrim$(strAireTemp)
                strArgileTemp = Mid$(strLine, 28, 10)
                strArgile = LTrim$(strArgileTemp)
                Line Input #11, strLine
                strLimonTemp = Mid$(strLine, 28, 10)
                strLimon = LTrim$(strLimonTemp)
                Line Input #11, strLine
                strSableTemp = Mid$(strLine, 28, 10)
                strSable = LTrim$(strSableTemp)
                Print #12, strCel & ";" & strAire & ";" & strArgile & ";" & strLimon & ";" & strSable
                Line Input #11, strTemp
                Line Input #11, strTemp
                Line Input #11, strTemp
                Line Input #11, strTemp
                intN = intN + 7
            Else
                Line Input #11, strTemp
                intN = intN + 1
            End If
        Loop

        ' Lire le reste du fichier
        If Not EOF(11) Then
            Line Input #11, strTemp
            intN = intN + 1
        End If

    Loop

    If chkCN.Value = 1 Then
        intErr = MsgBox("Vous ne pouvez obtenir d'information concernant N pour ce type de fichier", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
    Elseif chkCP.Value = 1 Then
        intErr = MsgBox("Vous ne pouvez obtenir d'information concernant P pour ce type de fichier", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
    Elseif chkCSSL.Value = 0 And chkCSSy.Value = 0 Then
        intErr = MsgBox("Vous devez choisir les informations que vous désirez!", vbOKOnly + vbExclamation, "Erreur!")
    Else
        intErr = MsgBox("Transformation terminée!", vbOKOnly + vbExclamation, "Succès!")
    End If

    Close #11
    Close #12

End If
End If
End If

End Sub

Private Sub menuOpen_Click(Index As Integer)
    ' CancelError à True
    dlgOpen.CancelError = True
    On Error GoTo errhandler
    ' flags
    dlgOpen.Flags = cdlOFNHideReadOnly Or cdlOFNFileMustExist Or cdlOFNNoChangeDir Or cdlOFNNoReadOnlyReturn Or cdlOFNPathMustExist
    ' filtres
    dlgOpen.Filter = "Fichier dat (*.dat)|*.dat|Fichier doc (*.doc)|*.doc" And "Fichier doc (*.doc)|*.doc"

```

```
dlgOpen.ShowOpen
```

```
strFichier = dlgOpen.FileName  
strTitrefichier = dlgOpen.FileTitle
```

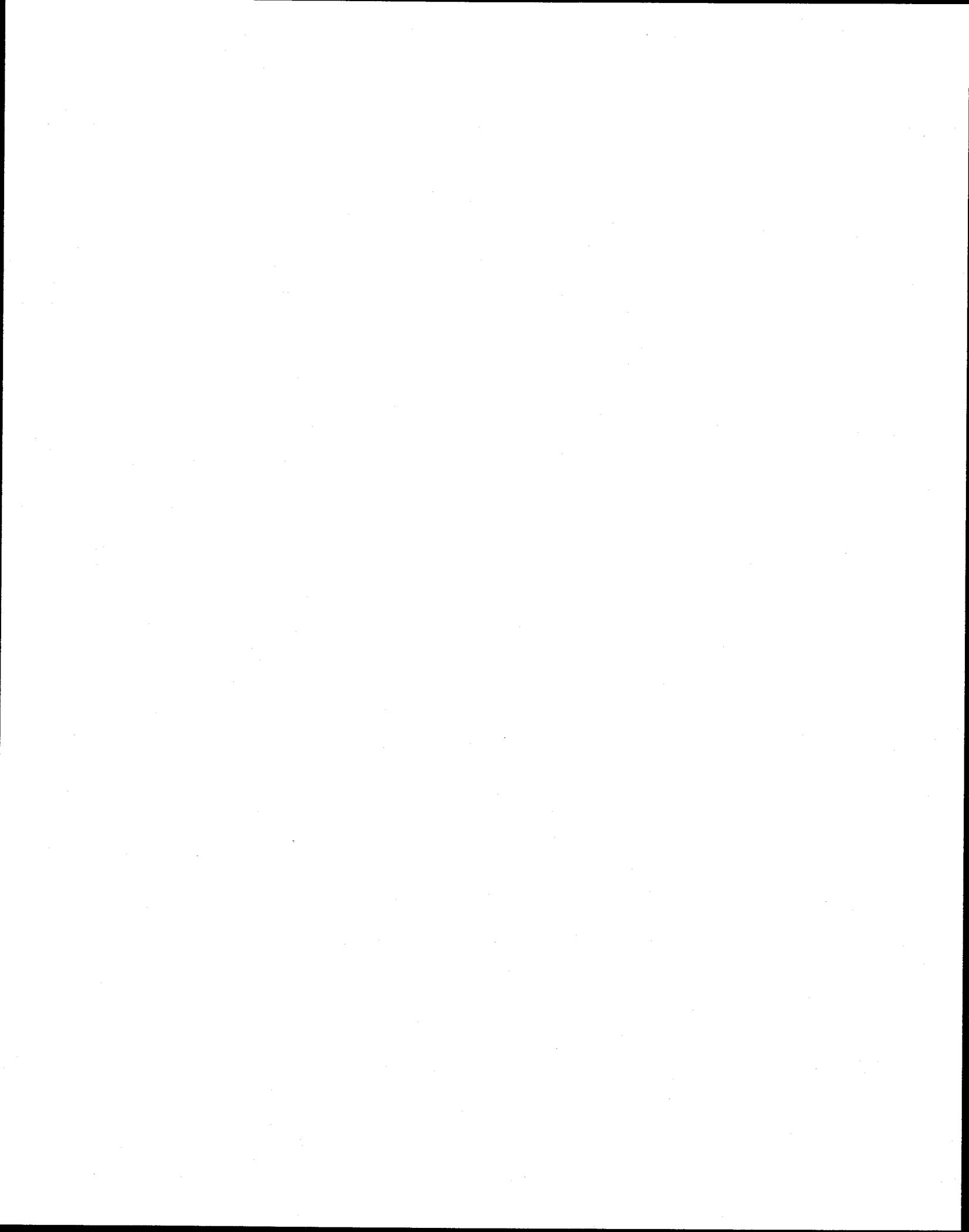
```
errhandler:  
Exit Sub
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mnuQuit_Click(Index As Integer)  
End  
End Sub
```

## **ANNEXE L**

**Résultats des simulations AnnAGNPS**



# 1 Résultats des simulations AnnAGNPS

## 1.1 Sorties totales mensuelles à l'exutoire

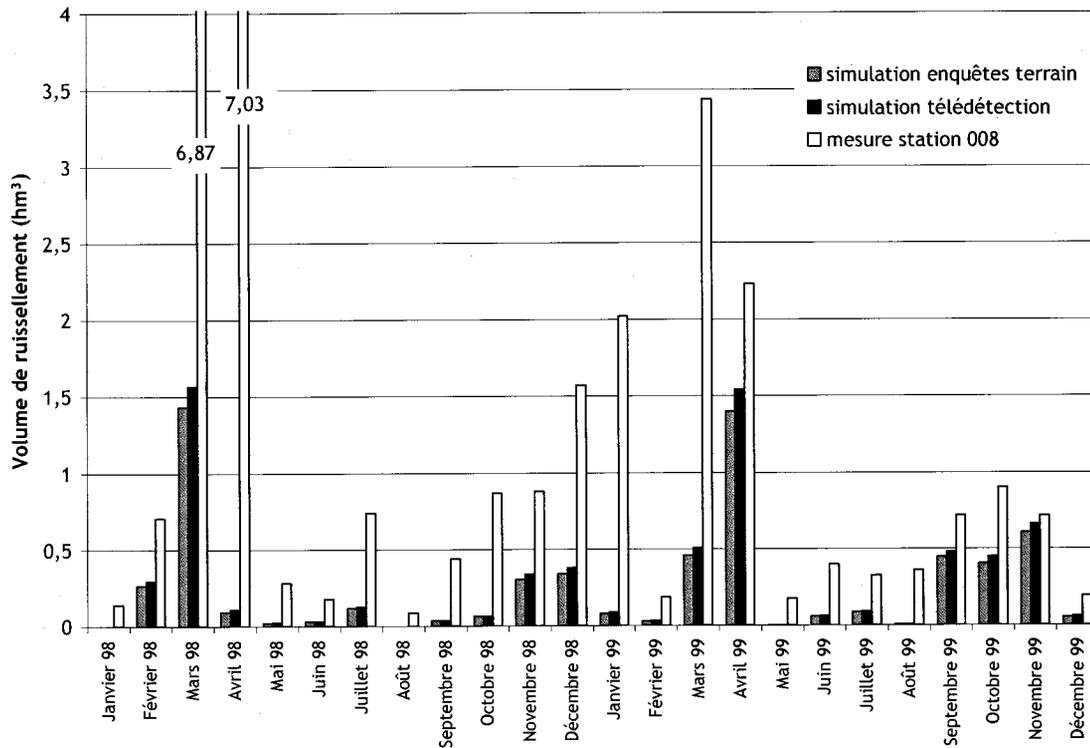


Figure L.1 : Volume de ruissellement d'eau à l'exutoire du bassin versant de la Boyer Nord

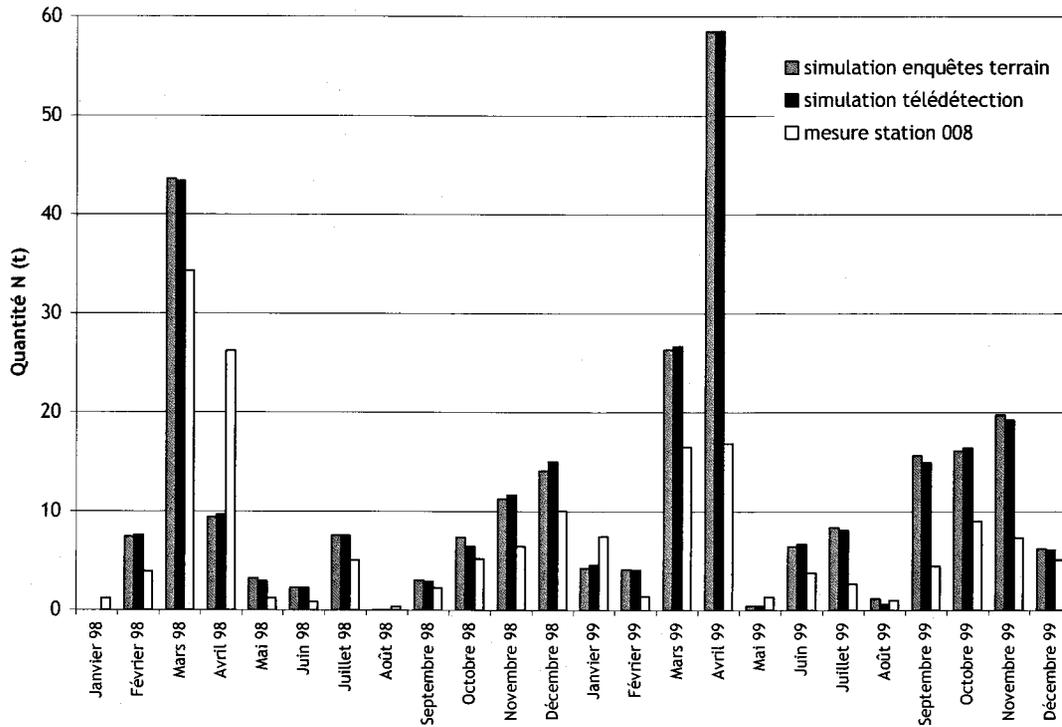


Figure L.2 : Quantité d'azote à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord

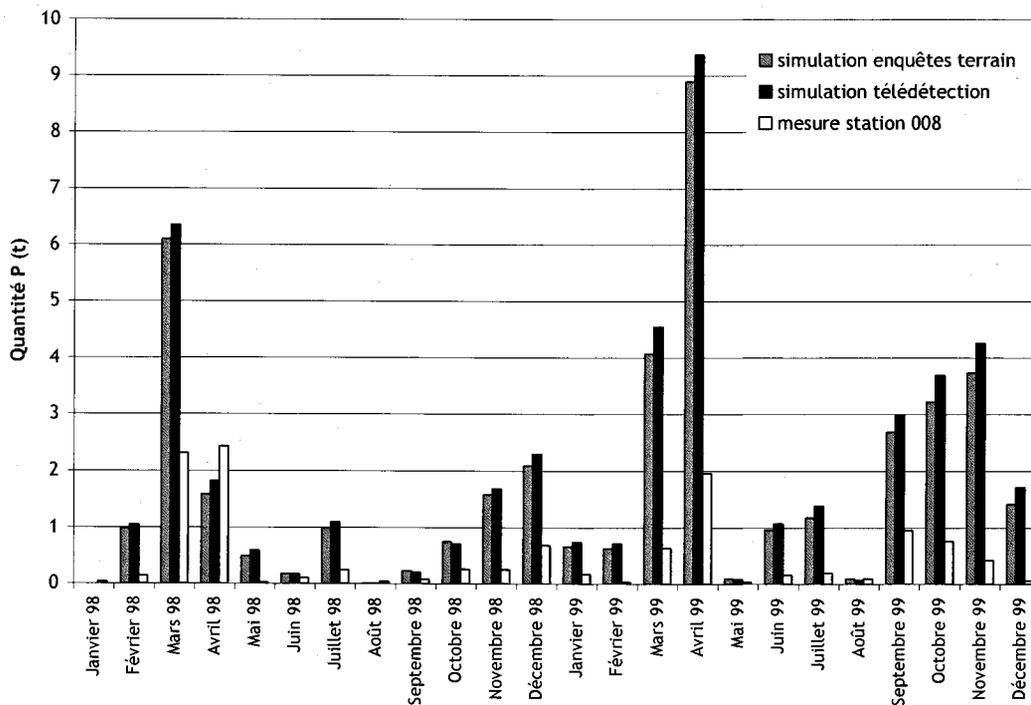


Figure L.3 : Quantité de phosphore à l'exutoire du bassin de la Boyer Nord

## 1.2 Qualité et quantité d'eau dans les tronçons de la Boyer Nord

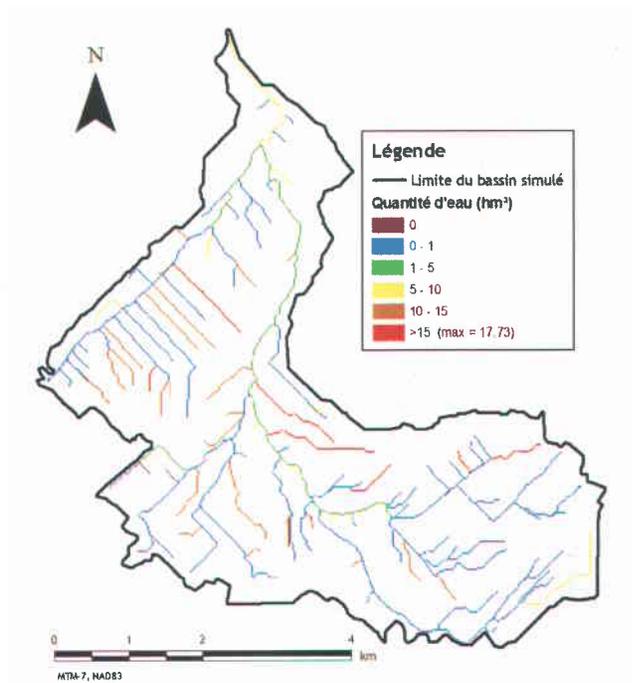


Figure L.4 : Quantité d'eau parcourant les tronçons durant la simulation avec les données des enquêtes terrain

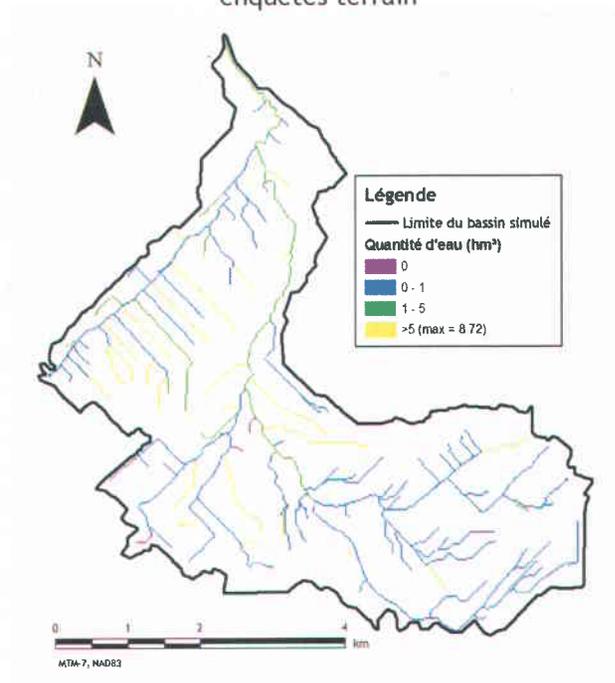


Figure L.5 : Quantité d'eau parcourant les tronçons durant la simulation avec les données de télédétection

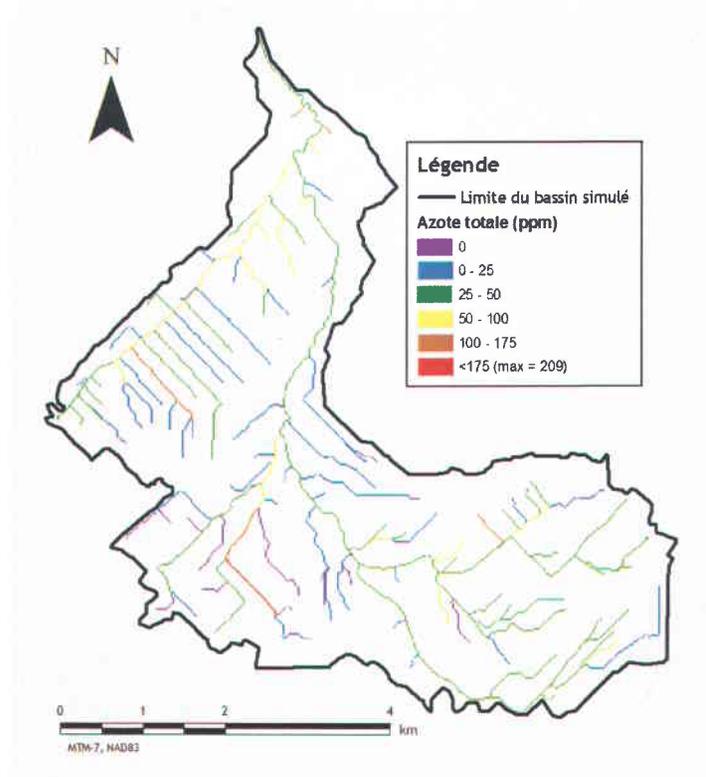


Figure L.6 : Concentration d'azote absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain

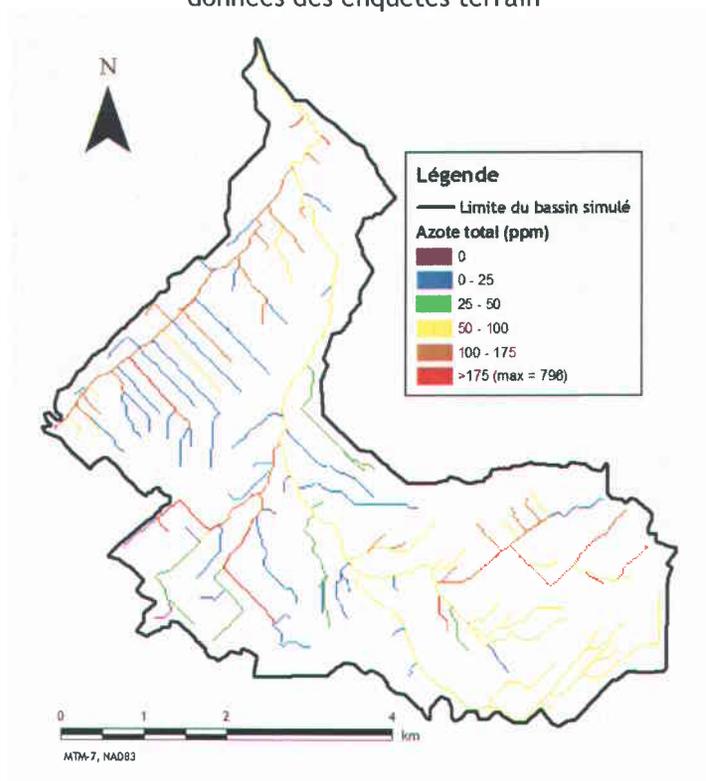


Figure L.7 : Concentration d'azote absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection

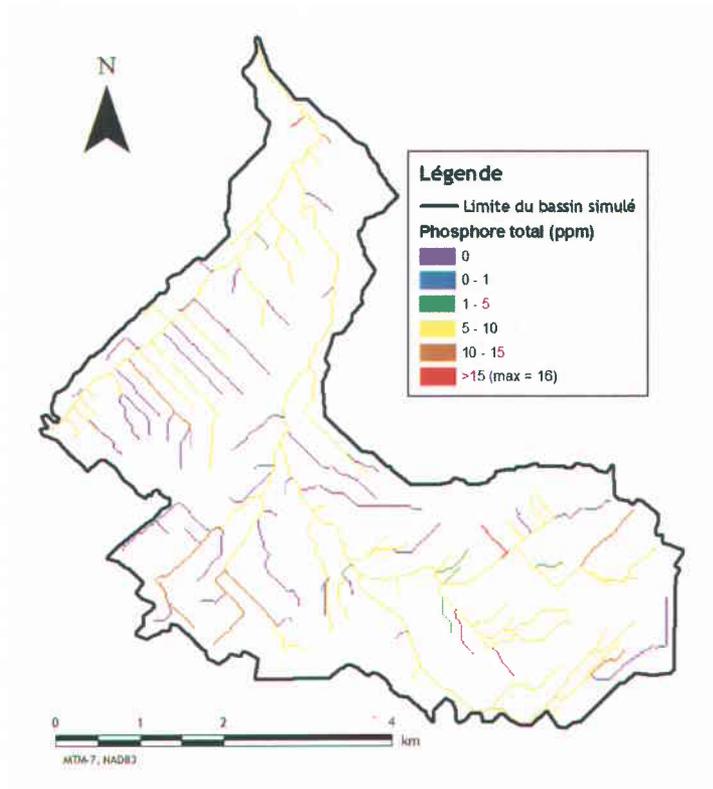


Figure L.8 : Concentration de phosphore absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données des enquêtes terrain

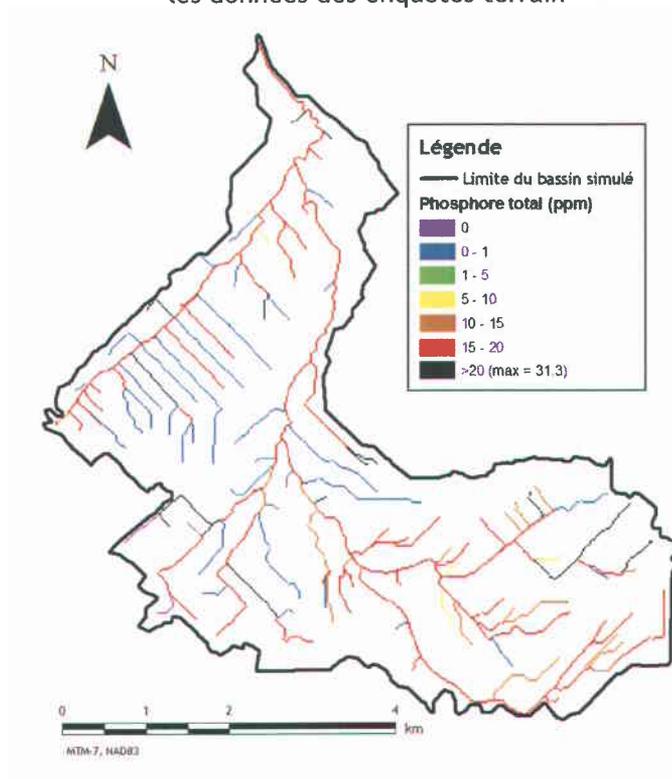


Figure L.9 : Concentration de phosphore absorbé et soluble dans les tronçons, simulation avec les données de télédétection

### 1.3 Contribution des cellules

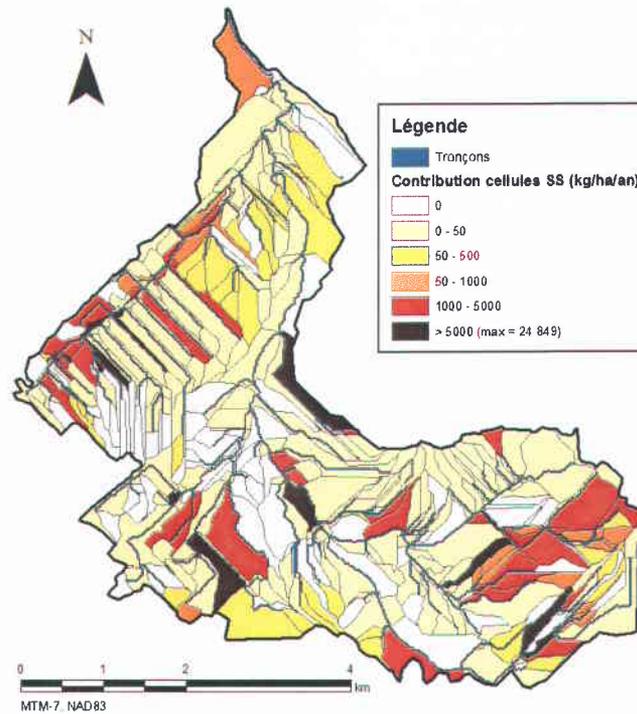


Figure L.10 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en sédiments en suspension à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain

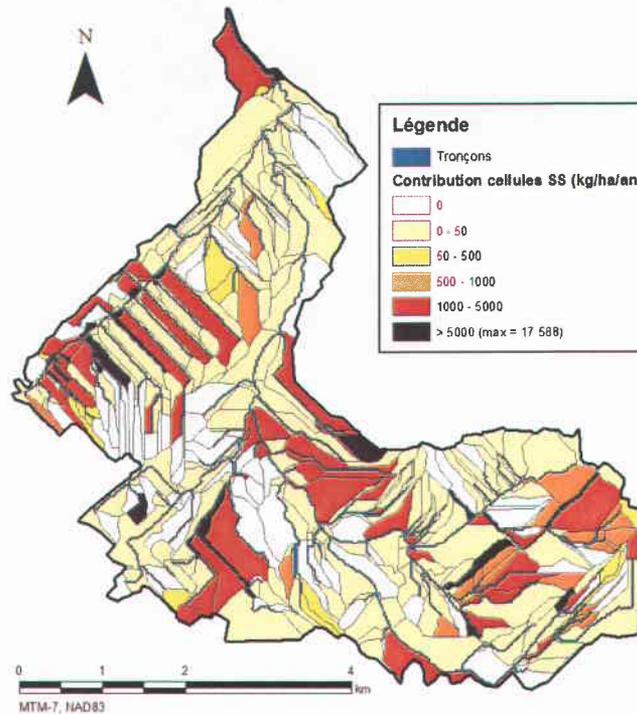


Figure L.11 : Contribution annuelle des cellules aux exportations en sédiments en suspension à l'exutoire du bassin selon la simulation avec les données de télédétection

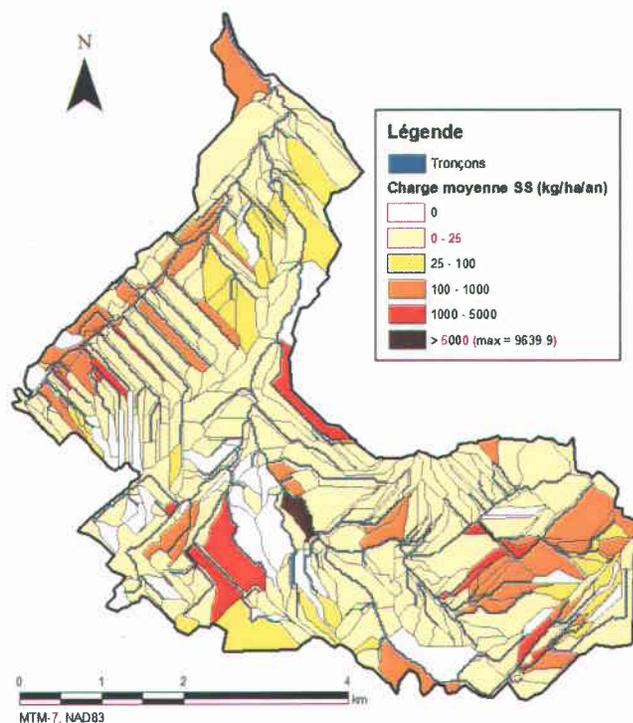


Figure L.12 : Charge moyenne en sédiments en suspension exportée annuellement des cellules du bassin selon la simulation avec les données des enquêtes terrain

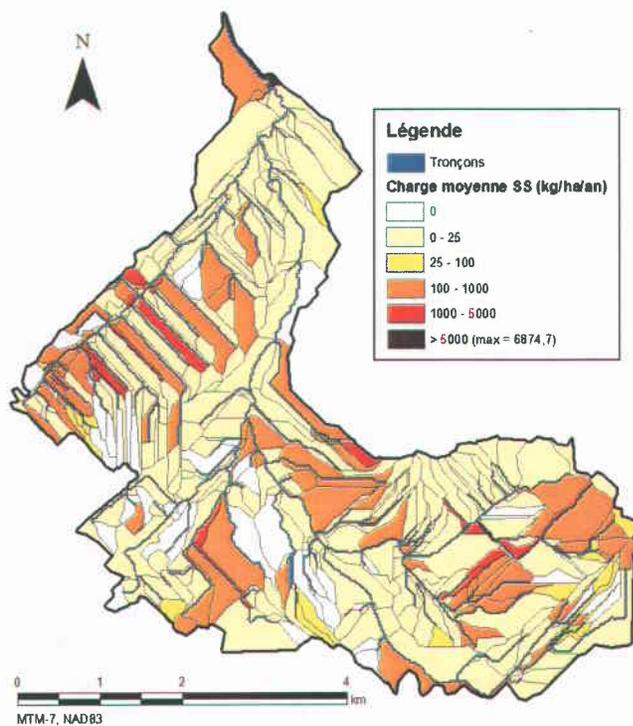


Figure L.13 : Charge moyenne en sédiments en suspension exportée annuellement des cellules du bassin selon la simulation avec les données de télédétection