



**Mention Géographie Environnementale**  
**Spécialité: Systèmes géographiques et environnements**  
**Mémoire Master2**  
**Année Universitaire 2012-2013**

## **Analyses spatiales des pressions anthropiques**

### **Exercées autour d'une aire protégée.**

- Cas du parc National du Nevado de Toluca au Mexique

**VILLANUEVA VILLA Antonio**

**Juin 2013**

Structure d'accueil : Unité Mixte de Recherche : Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale (TETIS). AgroParisTech, Cirad, Irstea-Cemagref

Maître de stage : Jacques IMBERNON : CIRAD, TETIS. Directeur de recherche  
Tuteur universitaire : Christiane WEBER : LIVE, Université de Strasbourg, Directrice de recherche

Composition du jury :

Christiane WEBER : Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) Université de Strasbourg. Directrice de recherche.

Dominique SCHWARTZ : Université de Strasbourg-Directeur de Master 2 : Mention Géographie Environnementale.

Sandrine GLATRON : Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE), Université de Strasbourg- Directeur adjoint du LIVE.



Pour contacter l'auteur de ce mémoire :

[aavillanuevav@gmail.com](mailto:aavillanuevav@gmail.com)

Ce travail a bénéficié d'un soutien financier de l'unité de recherche TETIS rattachée à la maison de la Télédétection et le CIRAD Montpellier, dans le cadre du projet « SELINA-Mexique ».

#### **Notes pour le lecteur**

Ce rapport est le résultat d'un travail effectué par un étudiant de Master 2 Mention Géographie Environnementales Spécialité : Systèmes géographiques et environnements

Les résultats présentés et discutés dans ce document sont des résultats préliminaires, et – pour certains- non encore totalement validés.

Ce rapport ne doit donc être considéré que comme un exercice de formation.

De plus les données présentées dans ce rapport correspondent à une évaluation réalisée au quatrième mois sur 6 mois de stage au total : ce sont des résultats intermédiaires.

Le « nous » employé dans le texte est une figure de style pour désigner l'auteur.

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le jury d'examen du Master 2 en Géographie Environnementale pour m'avoir suivi et encadrer de cette année universitaire.

Merci à «Christiane Weber», mon tuteur universitaire, pour sa disponibilité et sa qualité d'encadrement.

Un grand merci aux personnes m'ayant accompagné le long de ce stage qui marque le début de mon parcours de recherche, avec une thèse de doctorat qui devrait suivre.

Jacques Imbernon, mon responsable de stage à l'Unité Mixte de recherche TETIS, en lien avec la maison de la Télédétection, et le CIRAD Montpellier, pour son encadrement sans faille. Il a su me diriger lorsque j'avais des questionnements. Merci pour sa patience, sa disponibilité, sa qualité d'encadrement et sa bonne humeur.

Aux agents du CIRAD Montpellier et aux stagiaires CIRAD, pour l'ambiance d'entraide, pour les discussions animées et pour les blagues à la pause de midi.

Enfin, je voudrais remercier :

- les personnes qui ont accompagné mes études universitaires en France. Elles sont si nombreuses que je ne pourrais en citer que quelques unes ici.
- Eugenio Figueroa, pour son encadrement et son soutien depuis ma Licence à l'Université nationale du Chili.
- ma famille au Chili pour son soutien permanent malgré la distance.
- ma femme pour tout son soutien et sa compréhension pendant les longues nuits de travail pour finaliser ce mémoire. Merci d'avoir partagé ce bout de route avec moi, Francesca.

*Si existe otra vida, debe haber dicha y alegría, espero  
puedas compartir donde estés madre mía, mi alegría*

# **TABLE DES MATIÈRES**

<b>FIGURES</b>	<b>8</b>
<b>TABLES</b>	<b>10</b>
<b>LISTE DES ABBREVIATIONS</b>	<b>11</b>
<b>RESUME</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>14</b>
<b>1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE</b>	<b>14</b>
<b>1.2. LA PROBLEMATIQUE DE LA PRESSION ANTHROPIQUE DANS L'AXE VOLCANIQUE CENTRAL ET PNNT</b>	<b>15</b>
<b>1.3. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1. OBJECTIFS GENERAL</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES</b>	<b>16</b>
<b>1.4. ZONE D'ETUDE</b>	<b>16</b>
<b>1.5. SCHEMA GENERAL DE L'ETUDE</b>	<b>19</b>
<b>2. L'ACTIVITE MINIERE : UNE ACTIVITE ILLEGALE LIEE A LA PROXIMITE DE LA VILLE</b>	<b>20</b>
<b>2.1. PROBLEMATIQUE</b>	<b>21</b>
<b>2.2. OBJECTIFS</b>	<b>22</b>
<b>2.3. ZONE D'ETUDE</b>	<b>23</b>
<b>2.4. LE CONTEXTE LOCAL DE L'ACTIVITE MINIERE</b>	<b>24</b>

<b>2.5. DONNEES ET METHODES UTILISEES DANS NOTRE ANALYSE</b>	<b>26</b>
2.5.1. DIGITALISATION DES POLYGONES AVEC ACTIVITE MINIERE	26
2.5.2. INFORMATION DE BASE POUR L'ANALYSE DE L'ACTIVITE MINIERE A CIEL OUVERT DANS LE PNNT	27
2.5.2.1. DESCRIPTION DES VARIABLES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.5.3. QUANTIFICATION DES VARIABLES	29
2.5.3.1. DENSITE DE L'ACTIVITE MINIERE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.5.3.2. DISTANCE DE LA COUVERTURE FORESTIERE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.5.3.3. DISTANCE DES ZONES URBAINES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2.5.3.4. INTEGRATION DE VARIABLES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<b>2.6. RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>30</b>
2.6.1. LES POLYGONES AVEC ACTIVITE MINIERE DETECTE	30
2.6.2. DENSITE D'ACTIVITE MINIERE	31
2.6.3. DISTANCE DE LA COUVERTURE FORESTIERE DENSE	31
2.6.4. DISTANCE A ZONES URBAINES	33
2.6.5. EXEMPLES DES DYNAMIQUES DE L'ACTIVITE MINIERE.	34
2.6.6. DISCUSSION	39
<b>3. LA FLORICULTURE. DE L'EAU DU NEVADO POUR DES FLEURS D'EXPORTATION A DES RIVIERES CONTAMINEES METTANT EN DANGER LA SANTE HUMAINE.</b>	<b>40</b>
<b>3.1. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE</b>	<b>40</b>
<b>3.2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE</b>	<b>42</b>
<b>3.3. ZONE D'ETUDE.</b>	<b>42</b>
<b>3.4. LA FLORICULTURE DANS L'ETAT DU MEXIQUE</b>	<b>44</b>
3.4.1. UN PEU D'HISTOIRE SUR LA FLORICULTURE DANS L'ETAT DE MEXICO.	44
3.4.2. LA DIMENSION ECONOMIQUE DE LA FLORICULTURE	45
3.4.3. LA DIMENSION SOCIALE DE LA FLORICULTURE.	47
3.4.4. LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE DE LA FLORICULTURE	48
<b>3.5. LES IMPACTS POTENTIELS POUR LA SANTE HUMAINE.</b>	<b>50</b>
<b>3.6. DONNEES ET METHODES UTILISEES DANS NOTRE ANALYSE</b>	<b>52</b>
3.6.1. DIGITALISATION DES POLYGONES DE SERRES	52
3.6.2. INFORMATION DE BASE POUR LA DELIMITATION DES MICROS BASSINS VERSANTS DU BASSIN VERSANT AMACUZAC.	53
3.6.3. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION EN EAU PAR LA FLORICULTURE SUR CHAQUE MICRO-BASSIN VERSANT	55
3.6.4. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DE PESTICIDES PAR MICRO-BASSIN VERSANT	55

3.6.5.	LE RISQUE SUR LA SANTE HUMAINE _____	56
<b>3.7.</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSION</b> _____	<b>57</b>
3.7.1.	SURFACES CULTIVEES SOUS SERRES _____	57
3.7.2.	DELIMITATION DE MICRO-BASSINS VERSANT _____	59
3.7.3.	DISTRIBUTION SPATIALE DES SERRES _____	61
3.7.4.	RESULTATS DE L'ESTIMATION DE LA CONSOMMATION D'EAU PAR LA FLORICULTURE DANS LE BASSIN VERSANT AMACUZAC _____	63
3.7.5.	CONSOMMATION DE BROMURE DE METHYLE _____	65
3.7.6.	LA POPULATION EXPOSEE A LA POLLUTION PAR LE BROMURE DE METHYLE _____	66
3.7.7.	DISCUSSION _____	69
<b>4.</b>	<b>FRAGMENTATION DES FORETS. REALITE ET CONTRAINTES D'UN CORRIDOR FORESTIER S'ETENDANT DU PARC DU NEVADO DE TOLUCA JUSQU'AU PARC DU POPOCATEPELT.</b> _____	<b>70</b>
<b>4.1.</b>	<b>PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE</b> _____	<b>70</b>
<b>4.2.</b>	<b>OBJECTIFS DE RECHERCHE</b> _____	<b>71</b>
<b>4.3.</b>	<b>ZONE D'ETUDE</b> _____	<b>71</b>
<b>4.4.</b>	<b>PRINCIPES ET CONCEPTS EN ECOLOGIE DU PAYSAGE</b> _____	<b>73</b>
4.4.1.	QUELQUES DEFINITIONS DU PAYSAGE _____	73
4.4.2.	L'ECOLOGIE DU PAYSAGE : UNE DEMARCHE INTERDISCIPLINAIRE SUR LES RELATIONS HOMME-NATURE _____	74
4.4.3.	LES ELEMENTS CONSTITUANTS D'UN PAYSAGE _____	74
4.4.4.	LA FRAGMENTATION DES PAYSAGES ET DES ECOSYSTEMES _____	75
4.4.5.	LA CONNECTIVITE DES ECOSYSTEMES ET LES CORRIDORS ECOLOGIQUE _____	76
4.4.6.	LES INDICATEUR UTILISES EN ECOLOGIE DU PAYSAGE _____	77
4.4.7.	LES OUTILS POUR MESURER CES INDICATEUR _____	78
<b>4.5.</b>	<b>DONNEES ET METHODES UTILISEES DANS NOTRE ANALYSE</b> _____	<b>79</b>
4.5.1.	LES DONNES D'OCCUPATION DES TERRES _____	80
4.5.2.	LE MODELE DE PERCOLATION _____	82
4.5.3.	CHOIX DES INDICATEUR POUR LA FRAGMENTATION ET LA CONNECTIVITE _____	84
<b>4.6.</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSION</b> _____	<b>87</b>
4.6.1.	CONNECTIVITE DE LA COUVERTURE FORESTIERE _____	87
4.6.2.	LES ZONES DE SUSCEPTIBILITE DE PERTE DE CONNECTIVITE FORESTIER _____	89
4.6.3.	ANALYSE DE LA FRAGMENTATION FORESTIERE DANS LE CORRIDOR QUI RELIE LES PARCS _____	95
4.6.4.	LES PRESSIONS EXERCEES PAR L'ACTIVITE DE L'HOMME _____	96
4.6.5.	DISCUSSION _____	98

<b>5. <u>MODELISATION SPATIALE DES PRINCIPALES PRESSIONS ANTHROPIQUES ETUDIEES</u></b>	<b>99</b>
<b>5.1. <u>LE CORRIDOR FORESTIER ET LES PARCS NATURELS PROTEGES</u></b>	<b>101</b>
<b>5.2. <u>ZONES AGRICOLES ROUTES ET ZONES URBAINES</u></b>	<b>102</b>
<b>5.3. <u>LES ROUTES COMMENT BARRIERES DU CORRIDOR FORESTIER</u></b>	<b>103</b>
<b>5.4. <u>PRESSIONS ANTHROPIQUE ET INTEGRATIONS DE VARIABLES</u></b>	<b>103</b>
<b>5.5. <u>DISCUSSION</u></b>	<b>105</b>
<b>6. <u>BIBLIOGRAPHIE</u></b>	<b>106</b>

## FIGURES

Figure 1: Le Parc National Nevado De Toluca_____	17
Figure 2: L'axe Volcanique Central Et Les Differentes Aires Naturelles Protegees_____	18
Figure 3: Schema General De L'etude_____	19
Figure 4: Parc Nevado De Toluca_____	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
Figure 5: Localisation Des Mines Officiellement Reconnues Dans Les Limites Du Pnnt_____	25
Figure 6: Application Quantum Gis Et Sur La Digitalisation De Serres_____	26
Figure 7: Usages De Sols Forestiers Et Urbains_____	27
Figure 8: Schema De Syntheses Pour L'obtention De Zones Les Plus Sensible De La Pression Par Activite Miniere_____	28
Figure 9: Zones Avec Activite Miniere_____	30
Figure 10: Densite De L'activite Miniere_____	31
Figure 11: Distance De Couverture De La Foret Dense_____	32
Figure 12: Distance Des Zones Urbaines_____	33
Figure 13: Exemple De La Recuperation De Sol Entre 2006 Et 2012._____	35
Figure 14: Exemple De L'avance De L'activite Miniere Sur Sols Agricoles Entre 2012 Et 2013_____	36
Figure 15: L'avance De L'activite Miniere Sur Sols Agricoles Entre 2012 Et 2013_____	37
Figure 16: Photos Des Parcelles Ou S'a Augmente Les Activites Minières En 2012_____	38
Figure 17: Le Corridor De La Floriculture Dans L'état De Mexico_____	42
Figure 18: Localisation Du Bassin Versant Amacuzac_____	43
Figure 19: Marche Local Dans L'état De Mexico_____	46
Figure 20 : Bassins De Stockage De L'eau Et Canaux De Distribution Pour L'irrigation Des Serres _____	48
Figure 21: Quelques Produits Agrochimiques Utilises Sur Les Cultures De Fleurs_____	50
Figure 22: L'utilisation De Quantum Gis Synchronise Avec Googleearth Pour La Cartographie Des derres de La Floriculture._____	52
Figure 23: Le Modele Numerique De Terrain Utilise Sur La Bassin Versant Amacuzac_____	53
Figure 24: Schema Du Modele De Calcul Des Micro-Bassins Versants_____	54
Figure 25: Cartographie Des Serres De La Floriculture Dans La Partie Amont Du Bassin Versant d'amacuzac._____	57
Figure 26: Zones Avec Serres Dans Le Bassin Versant Amacuzac_____	58
Figure 27: Calculs Utilises Pour L'estimation Des Micro-Bassins Versant : Pentes Du Terrain Et hierarchie Des Cours D'eau_____	59
Figure 28: Delimitation Des Micro-Bassins Versants_____	60
Figure 29: Surfaces (Ha) Couvertes En Serres Par Micro-Bassin Versant Et Par Commune_____	61
Figure 30: Distribution Des Surfaces (Ha) De Serres Par Micro- Bassin Versant Et Par Commune_____	62
Figure 31: Distribution De La Consommation En Eau (M <sup>3</sup> ) Par Micro-Bassin Versant Et Par Commune_____	63
Figure 32: Distribution Spatiale De La Consommation En Eau (M <sup>3</sup> ) Par Micro- Bassin Versant Et par Commune_____	64



Figure 33: Consommation En Bromure De Methyle (Kg) Par Micro-Bassin Versant Et Par commune_____	65
Figure 34: Consommation En Bromure De Methyle (Kg) Par Micro-Bassin Versant Et Par commune_____	66
Figure 35: Population Exposee A La Pollution Au Bromure De Methyle Par Micro- Bassin Versant _____	67
Figure 36: Population Exposee A La Pollution Au Bromure De Methyle Par Micro- Bassin Versant _____	68
Figure 37: Zone D’etude Et Parcs De La Zone Centrale Du Mexique_____	72
Figure 38: Demarche Scientifique En Ecologie Du Paysage_____	74
Figure 39: Les Elements Constituants Du Paysage_____	75
Figure 40: Différents Niveaux De Fragmentation Du Paysage_____	75
Figure 41: La Connexion D’habitats Par Un Corridor_____	76
Figure 42: Carte D’occupation Des Terres Utilisee Dans Notre Analyse (Conabio), 2005_____	79
Figure 43: Carte D’occupation De Terre Apres Regroupement_____	81
Figure 44: Etats De Percolation_____	82
Figure 45: Exemple Des Bras Morts Dans La Theorie De La Percolation_____	83
Figure 46: La Connectivite Des Ecosystemes Forestiers Dans La Region Centrale Volcanique Du Mexique_____	87
Figure 47: Les Corridors Forestiers ‘Potentiels’ Apres ‘_____’	88
Figure 48: La Connectivite Forestiere En Lien Avec Le Relief De La Region D’etude_____	89
Figure 49: Les Zones Susceptibilite De Perte De Connectivite Forestiere (A Et B) Et De Barriere A La Connectivite (C)_____	90
Figure 50: Occupations Des Sols Dans Les Trois Zones De Susceptibilite Pour La Connectivite Et dans L’ensemble Du Corridor Forestier_____	91
Figure 51: Fragmentation Du Paysage Dans Les Zones De Susceptibilite Et Sur L’ensemble Du Corridor Forestier_____	91
Figure 52: Occupation Des Sols Dans La Zone A_____	92
Figure 53: Occupation Des Sols Dans La Zone De Susceptibilite B_____	93
Figure 54: Occupation Des Sols Dans La Zone De Susceptibilite C_____	94
Figure 55: Occupation Des Sols Dans Les Parcs Et Dans Le Corridor Forestier_____	95
Figure 56: Fragmentation Du Paysage Des Parcs Et Du Corridor Forestier_____	96
Figure 57: Les Barrieres A La Connectivite Que Constitue Le Reseau Routier_____	97
Figure 58: La Grammaire Chorematique De Brunet_____	100
Figure 59: Grammaire De Choremes Utilisees Pour Le Modele De Synthese_____	101
Figure 60: Choremes Du Corridor Forestier Et Des Aires Naturels Protegees_____	102
Figure 61: Choremes Des Zones Urbaines Et Zones Agricoles_____	102
Figure 62: Choremes Des Routes Comment Barriere Du Corridor Forestier_____	103
Figure 63: Choremes Des Pressions Anthropiques Sur Les Aires Protegees_____	104
Figure 64: Choremes Integree Representant Des Pressions Anthropiques Sur Le Corridor Forestier De L’axe Volcanique Central Du Mexique_____	104

## **TABLE DES TABLES**

Tableau 1: Les Mines Officiellement Reconnues Dans Les Limites Du PNNT_____	24
Tableau 2: Description Des Variables._____	29
Tableau 3: Tableau 2 L'intervalle D'incidence Du Territoire_ <b><u>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</u></b>	
Tableau 4: Zones D'activite Miniere_____	30
Tableau 5:Principaux Etats Producteurs De Fleurs Au Mexique En 2008_____	45
Tableau 6: La Toxicite Des Principaux Produits Agrochimiques Utilises Dans La Culture De Fleurs _____	51
Tableau 7. Classes D'occupation Des Terres Apres Regroupement_____	80
Tableau 8. Les Indicateurs Spatiaux Retenus Pour Notre Analyse Du Paysage_____	84

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

AMIFAC: Association mexicaine de l'industrie phytosanitaire  
ANR : l'Agence nationale pour la recherche  
CIRAD : Centre International pour la recherche agronomique et le développement  
CNANP : Commission nationale des aires naturelles protégées du Mexique  
CONABIO : Commission nationale pour la biodiversité du Mexique  
EMC : Evaluation Multicritère  
IFOMEGEM : Informe minière national du Mexique  
INEGI : Institut national de la statistique et de géographie du Mexique  
Mexico DF : Capitale du Mexique  
OMS : L'Organisation Mondiale de la Santé  
PNNT: Parc National Nevados de Toluca, Mexique  
SEMARNAT : Secrétariat de l'environnement et des ressources naturelles  
SIG : Systèmes d'information Géographiques  
2000AGRO : Revue d'agronomie de la campagne du Mexique

# **RESUME**

## **Résumé**

Les aires protégées fournissent des biens et des services écosystémiques essentiels pour le bien être humain. Mais ces aires et leurs périphéries sont soumises à de fortes pressions anthropiques. C'est le cas tout particulièrement dans la région centrale du Mexique, avec la proximité de grandes villes comme Mexico DF et Toluca.

Evaluer ces pressions et leurs impacts sur les ressources naturelles, dans et autour de ces espaces protégés, est indispensable pour bien comprendre les processus en jeu, et être en mesure de proposer des mesures de protection pour orienter les politiques publiques. De fait, l'objectif central de cette recherche est d'identifier, localiser et caractériser les pressions exercées sur les ressources naturelles de cette région centrale du Mexique et évaluer leurs impacts environnementaux, en mobilisant les outils et les méthodes de l'analyse spatiale.

Cette recherche porte sur trois pressions anthropiques :

- \_ l'activité minière,
- \_ l'activité agricole sous serre (floriculture),
- \_ la fragmentation du couvert forestier sous l'effet de l'extension du domaine agricole, des espaces urbains et des infrastructures.

Les résultats obtenus mettent en évidence les zones les plus sensibles à ces pressions anthropiques dans et à la périphérie du parc et le rôle crucial que jouent les Aires Protégées dans la connectivité forestière de l'axe volcanique centrale du Mexique.

Mots clés : Aires protégées, analyse spatiale, connectivité forestière, pressions anthropiques, activité minière, activité agricole, Mexique.

## **Abstract**

The protected areas or natural parks provide goods and ecosystem services essentials for the human well-being. But, these areas and their peripheries are under human pressure, particularly in the central region of Mexico with the proximity of big cities such as Mexico City and Toluca. Evaluate this anthropogenic disturbance, and their impact on the natural resources, is essential to understand the ecologic processes and to guide environmental policy. The central objective of this study is to identify, locate and characterize the pressures exerted on the natural resources of this area and to evaluate their environmental impacts by mobilizing the tools and methods of the spatial analysis. This work was approached on three aspects:

- \_ The impact of mining,
- \_ Impact of agriculture (the greenhouse flowers),
- \_ Forest fragmentation and connectivity.

Also the results show the role of PNNT in forest connectivity of central volcanic of Mexico.

Keywords: The protected areas, forest connectivity, anthropogenic disturbances, impact of agriculture, Mexico.

# **1. INTRODUCTION**

Partout dans le monde, autour des Aires Naturelles Protégées, une grande diversité d'acteurs essayent d'exploiter, protéger ou préserver la biodiversité, dans des situations souvent caractérisées par des conflits, une grande pauvreté, une urbanisation rapide, un changement climatique plus ou moins réel et un commerce international qui se développe très rapidement. Le Parc National Nevado de Toluca (PNNT) et la région de l'axe volcanique central où il se situe au Mexique, constituent un excellent cas d'étude pour analyser ces processus et les enjeux qui y sont associés.

L'objectif de cette étude est d'analyser les pressions anthropiques sur cet espace, tant à l'intérieur du Parc du Nevado que dans sa périphérie. Les pressions anthropiques qui sont plus particulièrement analysées ici sont les activités minières, les activités agricoles et la fragmentation forestière liée à l'utilisation des terres. Chacune de ces pressions donne lieu dans le mémoire à un chapitre qui présente la méthodologie utilisée et analyse les résultats obtenus.

## **1.1. Contexte de l'étude**

Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet soutenu par l'Agence nationale pour la recherche (ANR) intitulé « Parc National Nevado de Toluca : Un laboratoire socio-environnemental pour des innovations politiques dans la gestion de parcs nationaux » (SELINA). Ce projet est mené en partenariat entre le CIRAD, l'ENS-Lyon, l'Institut technologique des études de l'occident (ITESO) au Mexique, et l'Université Autonome de l'Etat de México' (UAEM). Ce projet s'appuie sur les compétences développées par ces différentes équipes : diversité des systèmes de production agricole, utilisation des terres, caractérisation des conditions de vie des populations, impact des politiques publiques sur le développement durable, gestion communautaire des zones forestières, gouvernance et analyse des conflits et multifonctionnalité de l'agriculture.

Ce travail personnel a été mené dans des délais courts, entre Février et Mai 2013. Ca a été pour moi une expérience riche qui m'a permis de mettre en pratique mes acquis académiques, de me confronter à des équipes de recherche et d'acquérir de nouvelles compétences. Toutefois, du fait du peu de temps disponible, cette recherche doit être considérée comme une approche exploratoire des pressions anthropiques dans cette région du Mexique et nécessitera d'être approfondie. Ma thèse de doctorat devrait me donner l'occasion de développer cette recherche.

## **1.2. Les pressions anthropiques dans l'axe volcanique central**

La plupart des pays d'Amérique Centrale sont concernés par l'exploitation mal contrôlée des ressources naturelles et par les ambiguïtés des politiques publiques de protection et de conservation. Les impacts de ces pratiques et de ces politiques sur l'environnement sont variés, mais tous concernent les biens et les services écosystémiques (MEA<sup>1</sup>) (Ramousse et al. 2007).

Du fait en particulier d'une urbanisation croissante, d'une intensification des activités minières, et d'une extension des espaces cultivés, de nombreux habitats naturels se fragmentent et disparaissent, et plus généralement les écosystèmes se détériorent. Dans ce contexte la préservation des habitats naturels devient un enjeu majeur pour les politiques environnementales de ces pays. C'est la raison pour laquelle ont été créées ces dernières années des Aires naturelles Protégées et des Corridors Biologiques (par exemple le Corridor Biologique Mésoaméricain – CBM).

Ces Aires Naturelles Protégées fournissent des biens et des services écosystémiques, mais leur espace central et leur périphérie sont soumis à des pressions anthropiques fortes. C'est le cas en particulier de la région centrale du Mexique qui nous intéresse, avec la proximité de la mégapole de Mexico DF et des grandes villes que sont Toluca et Cuernavaca.

Pour bien comprendre les processus en jeu et être en mesure de proposer des mesures de protection pour orienter les politiques publiques dans cette région, il est indispensable d'évaluer les pressions anthropiques et leurs impacts sur les ressources naturelles .

Mais ces pressions anthropiques sont d'origines diverses, elle sont parfois diffuses ou parfois concentrées dans l'espace, et elles évoluent au cours du temps. Leur organisation spatiale est souvent liée à des réseaux d'infrastructures, à des bassins versants ou à des structures de peuplement humain. Et leurs impacts environnementaux : dégradation du couvert forestier, contamination des eaux ou érosion des sols sont locaux mais peuvent être parfois régionaux, comme dans le cas d'une pollution des eaux en amont de bassin versant.

---

<sup>1</sup> Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystemsand Human Well-Being: Synthesis Report, Washington, DC, Island Press (<http://www.millenniumassessment.org> [Synthesisreports ; Overall synthesis])

## **1.3. Objectifs de la recherche**

### ***1.3.1. Objectifs général***

L'objectif général est d'identifier, localiser et caractériser les pressions exercées sur les ressources naturelles dans et autour du Parc National Nevado de Toluca et d'évaluer leurs impacts environnementaux, en mobilisant les outils et les méthodes de l'analyse spatiale.

### ***1.3.2. Objectifs spécifiques***

Ces objectifs spécifiques sont ici au nombre de trois, correspondant à des pressions anthropiques différentes :

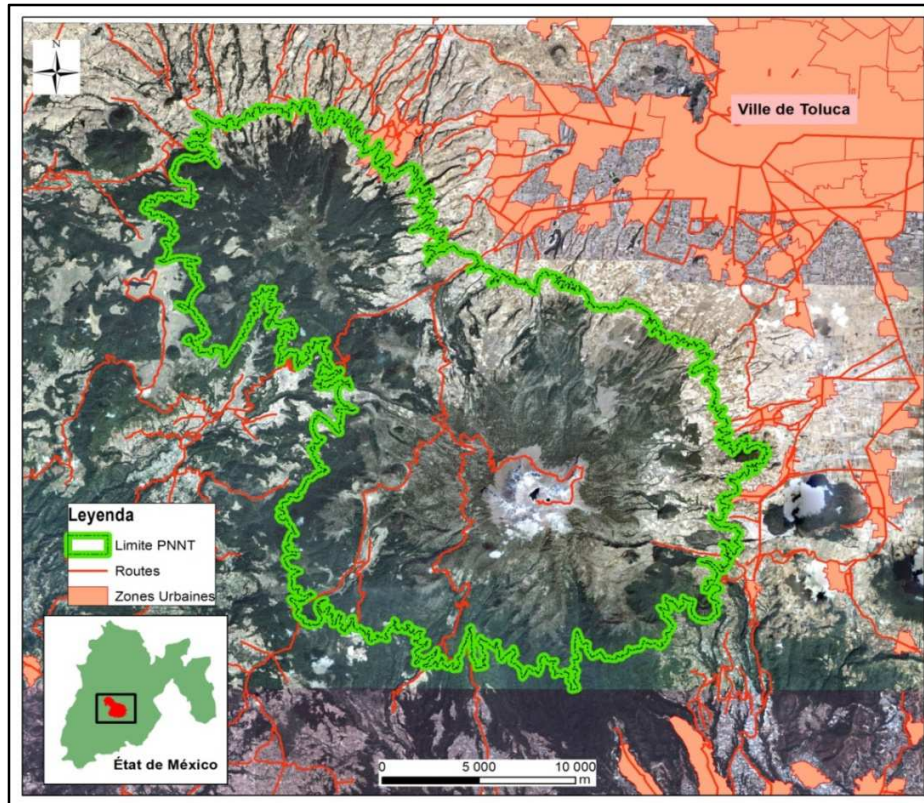
- Identifier, localiser et caractériser les pressions exercées sur les terres et la forêt par les activités minières dans le Parc du Nevado de Toluca et en périphérie, mettre en évidence leurs dynamiques et évaluer leurs impacts environnementaux.
- Identifier, localiser et caractériser les pressions exercées sur les ressources en eau (en quantité et en qualité) par l'horticulture sous serre, dans une région périphérique du Parc du Nevado appelée le « valle de la floricultura » et évaluer leurs impacts environnementaux.
- Analyser la fragmentation (dans ce cas, comme un état et non comme processus) du couvert forestier dans le 'valle central' dont fait partie le Parc du Nevado, mettre en évidence la connectivité du couvert forestier et identifier les « connecteurs » les plus sensibles.

## **1.4. Zone d'étude**

La zone d'étude est déclinée à deux échelles d'analyse différentes. Pour l'analyse de l'activité minière et de la floriculture, l'échelle d'observation est le Parc National Nevado de Toluca et sa périphérie. Pour l'analyse de la connectivité et de la fragmentation forestière, l'échelle de travail est l'ensemble des Aires Naturelles Protégées de l'axe volcanique central du Mexique: Mariposas Mornarca, Nevado de Toluca, corridor Écologique Chichinautzin et Iztaccíhuatl-Popocatépetl. Cette région relativement forestière subit une pression anthropique importante du fait de la proximité de la mégapole de Mexico DF et des villes millionnaires de Toluca et Cuernavaca.

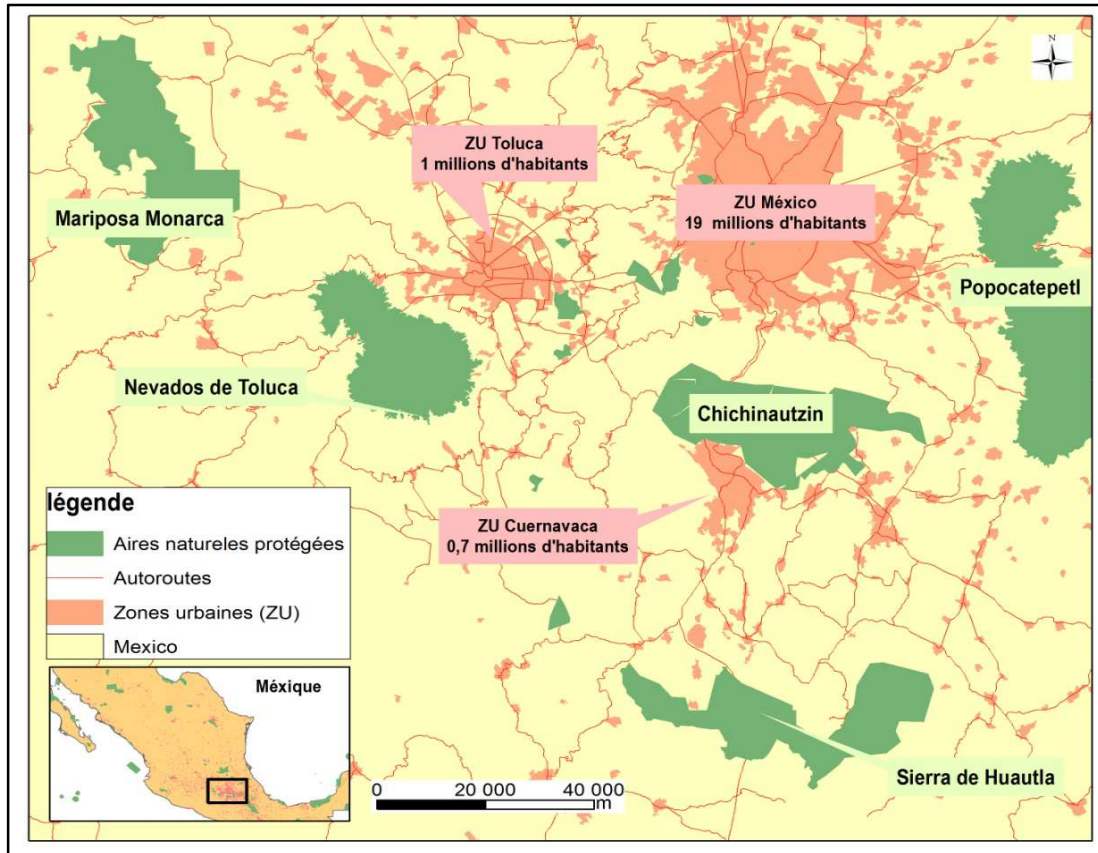
La Figure 1 suivante montre le PNNT et sa périphérie où ont été analysées l'activité minière et de la floriculture.





**Figure 1: Le Parc National Nevado de Toluca**  
 Source, Antonio Villanueva, 2013

La Figure 2 représente la région de l'axe volcanique central où a été menée l'analyse de la fragmentation du paysage.

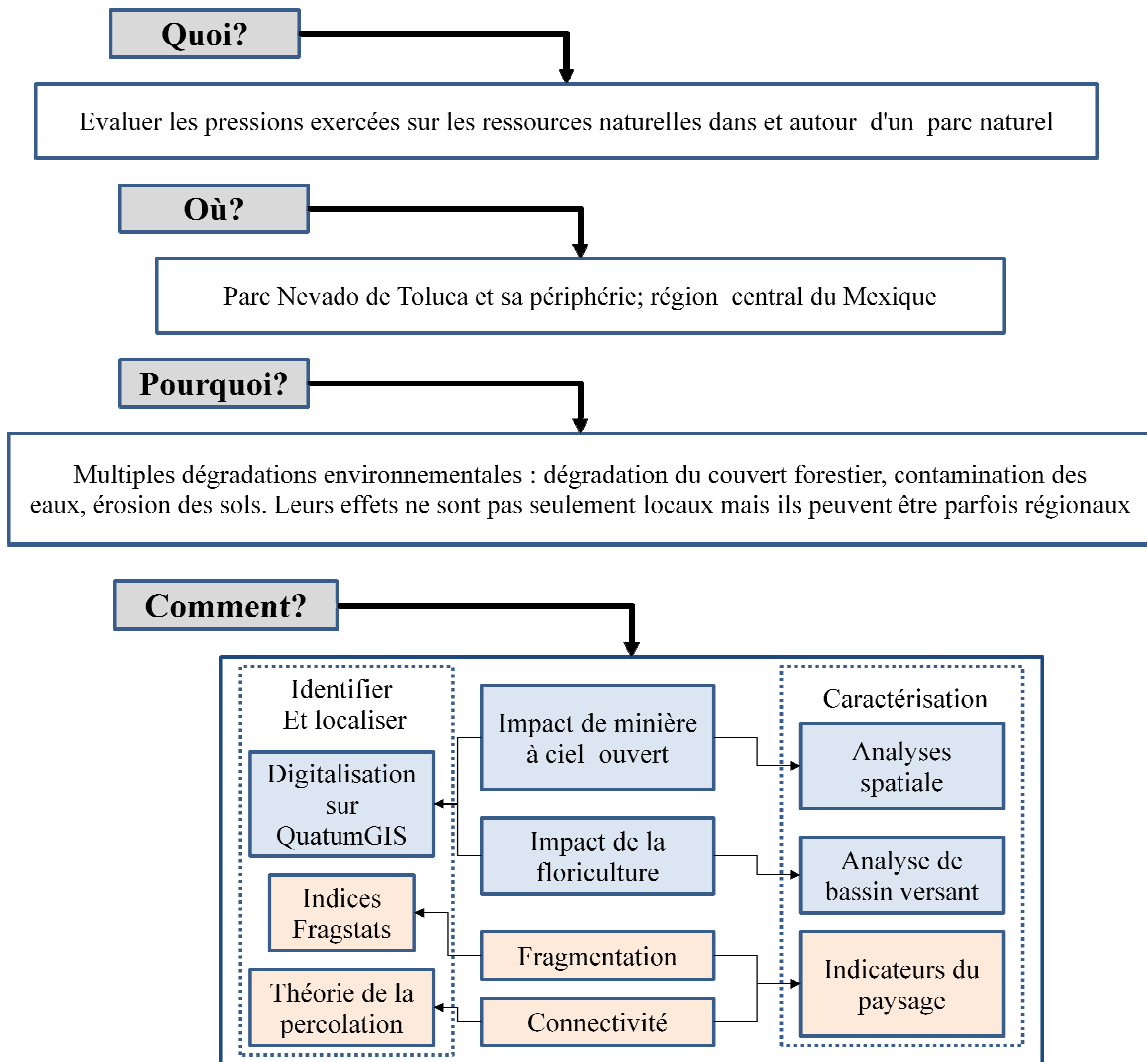


**Figure 2: L'axe volcanique central et les différentes Aires Naturelles Protégées de cette région.**

Source, Antonio Villanueva, 2013

## 1.5. Schéma général de l'étude

La structure générale de cette recherche est résumée ci-dessous (Figure 3) en quatre questions clés : Quoi? Où? Pourquoi? et Comment? Ces questionnements ont constitué le fil directeur de chacun des trois chapitres sur les pressions anthropiques.



**Figure 3: Schéma général de l'étude**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

## **2. L'activité minière : Une Activité illégale liée à la** **proximité de la ville**

Un des principaux intérêts du Parc National Nevado de Toluca (PNNT) est la contribution de biens et services environnementaux de ses écosystèmes. Le parc représente en effet la source la plus importante de services environnementaux pour le Valle de Toluca : qualité de l'air, habitats naturels, production de biomasse et séquestration de carbone, approvisionnement en eau (E.Rojas, 2007). Or, bien que le PNNT ait été déclaré par l'État du Mexique en 1936 (décret de création du PNNT) comme une priorité pour la conservation, il subit des pressions anthropiques fortes et sa couverture forestière devient de plus en plus fragmentée (Hernandez Garcia et al, 2006) (H.Regil, et al., 2009).

Parmi l'ensemble des menaces potentielles pour l'écosystème forestier du Nevado de Toluca, l'extraction minière et les changements d'utilisation des sols qu'elle entraîne, sont des problèmes cruciaux qui restent peu ou pas étudiés à ce jour. Aussi c'est ce processus spatial que nous chercherons à mettre en évidence et à analyser dans ce chapitre.

## 2.1. Problématique

La dégradation environnementale du PNNT se manifeste principalement par des changements d'utilisation des sols et une dégradation de la couverture forestière. Une des activités humaines qui sous-tend ce processus est l'extraction de gravier « tepojal<sup>2</sup> » (CNANP, 2013).

En 2006, l'Etat de Mexico où se situe le PNNT était le premier producteur des matériaux de construction du pays. 30 % de la production de l'État concernait le sable, lequel provient principalement de 13 communes voisines du Nevado. En ce qui concerne le gravier, c'est 99% de la production qui provient de deux villes : Calimaya et Rayón.

Malgré les impacts environnementaux de cette extraction de matériaux de construction, le Parc de Nevado lui-même est fortement touché par cette activité et il n'y a quasiment pas de mesures d'atténuation environnementales. Or légalement, le Parc National Nevado de Toluca (PNNT) est considéré une zone d'interdiction d'activité minière, à l'exception des mines qui étaient actives au moment de la création du Parc en 1936. Et malgré la richesse écosystémique du PNNT et les dispositions de conservation (certaines depuis plus de 50 ans), l'exploitation minière à ciel ouvert dans cette zone reste répandue. Cette exploitation minière est parfois légale mais elle le plus souvent illégale, sans aucun suivi ou évaluation d'impact. Il s'agit donc dans un premier de localiser systématiquement ces sites d'extraction, puis dans un deuxième temps d'estimer les dommages sur les écosystèmes.

---

<sup>2</sup> Type de gravier volcanique caractéristique de la zone PNNT

## 2.2. Objectifs

Comme il n'existe pas d'étude spécifique sur les activités minières dans et autour de Parc du Nevado (H.Regil, et al., 2009), nous nous proposons de mener une analyse spatiale des sites d'extraction et d'en évaluer l'impact environnemental. Cet objectif principal est décliné selon les objectifs spécifiques suivants:

- Identifier les mines à ciel ouvert par l'interprétation d'images satellitales.
- Analyser l'organisation spatiale de l'activité minière.
- 
- Evaluer la proximité de la végétation forestière et sa vulnérabilité.
- Faire une typologie des sites miniers selon des facteurs de distances à l'espace forestier, d'accessibilité à partir des espaces urbains, et de densité spatiale des sites d'extraction.

### **2.3. Zone d'étude**

Le Parc National Nevado de Toluca est localisé dans la zone centrale du Mexique et fait parti du système des aires protégées de l'axe volcanique central du Mexique (Figure 1). Sa surface est de 1.517 km<sup>2</sup> et il se situe entre les coordonnées géographiques 18° 51' 31" N et 19° 19' 03" N d'une part, et 99° 38' 54" W et 100° 09' 58" W d'autre part.

Du point de vue administratif il se divise entre les communes d'Almoloya de Juárez, Amanalco, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascalpecc, Tenango del Vallem Toluca, Villa Victoria, Villa Guerrero et Zinacantepec (CONABIO, 2012).

La limite du Parc reste relativement imprécise car le décret de création de 1936 fixe cette limite à l'altitude 3000 mètres. Or bon nombre des sites d'extraction minière se situent justement autour de cette altitude de 3000 m.

## 2.4. Le contexte local de l'activité minière

Les sites d'extraction se situent principalement dans les communes de Calimaya, Metepec, Zinacantepec, Toluca, San Antonio la Isla, Rayón, Mexicalzingo et Chapultepec. Elles représentent la principale source d'approvisionnement en matériaux de construction pour la zone Métropolitaine de Toluca. Les matériaux qui y sont extraits sont du sable et des graviers, dont des graviers d'origine volcaniques appelés « tepojal » et « tepetate ».

Cette activité minière pratiquée dans et autour d'un Parc aux limites mal définies crée des conflits d'intérêts et des pratiques illégales. Cela a des conséquences environnementales négatives pour le Parc ; l'érosion des sols, la conversion d'espaces naturels en mines à ciel ouvert, les glissements de terrain, la pollution atmosphérique par les poussières en suspension, le compactage des sols par les engins motorisés sont quelques uns des problèmes environnementaux liés à cette activité minière (Ayuntamiento de Toluca, 2006).

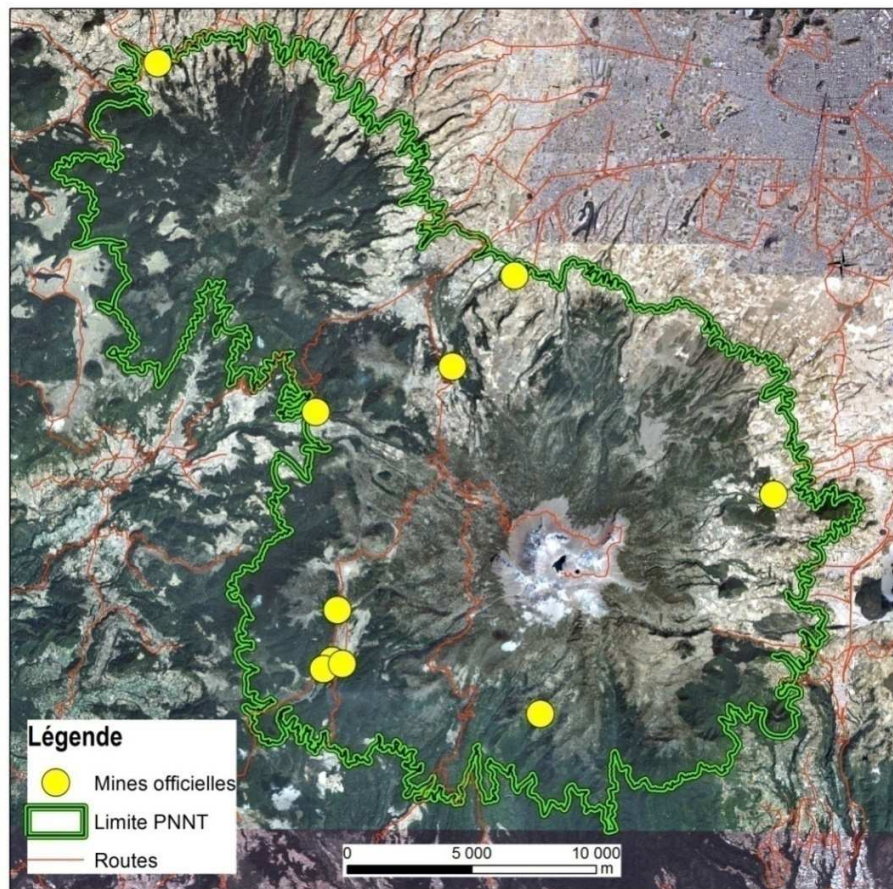
Personne jusqu'à présent ne connaît avec exactitude le nombre des mines actives ou inactives, légales ou illégales, ce qui rend difficile toute évaluation d'impact environnemental. Les seules mines 'reconnues' dans les limites du Parc sont au nombre de 10. (SMA-GEM-MPIO TOLUCA , 2010) (CNANP, 2013) (Figure 5) (Tableau 1).

N°	Nom de la mine	Longitude Ouest	Latitude Nord	Altitude (m)
1	Ejido Palo Mancomado	-99°54'49''	19°17'25''	3040
2	La Lagunilla	-99°40'40''	19°8'6''	3100
3	Ejido Coatepec	-99°45'59''	19°3'19''	3640
4	La Loba	-99°50'38''	19°5'33''	3320
5	El capulín	-99°50'45''	19°4'27''	3140
6	Las Lágrimas	-99°50'31''	19°4'23''	3140
7	El varal	-99°50'57''	19°4'16''	3140
8	Loma Alta	-99°48'02''	19°10'51''	3300
9	Mina el Atorón Proc. Jiménez	-99°46'37''	19°12'50''	3040
10	La Peñuela	-99°51'09''	19°9'51''	3020

**Tableau 1: Les mines officiellement reconnues dans les limites du PNNT**

Source: (CNANP, 2013)





**Figure 4: Localisation des mines officiellement reconnues dans les limites du PNNT**  
 Source : Antonio Villanueva, d'après (CNANP, 2013)

Mais, selon IFOMEGEM (2012), seulement la mine « Las Lágrimas », à « Temascaltepec » était active en septembre 2012. Elle fait d'ailleurs l'objet d'un programme d'appui à la réhabilitation de la part du Ministère de l'Environnement de l'État du Mexique. Aucune autre information n'est donnée, sur les autres mines : sont-elles actives ou non ? En 2010, un article de journal signalait que la Commission Nationale des Aires Naturelles Protégées avait détecté environ 300 mines dans les limites du PNNT. L'article mentionnait expressément que « *les règlements environnementaux fédéraux interdisent l'activité minière dans le Parc National Nevado de Toluca... et ces mines sont forcément illégales* (Lopez, 2010).

Les dommages environnementaux de cette activité minière sont indéniables. L'extraction minière a intensifié les processus érosifs sur le volcan et a modifié les cours d'eau en bouleversant localement la morphologie du terrain. Elle compromet même parfois la capacité d'infiltration des eaux pluviales et la recharge des nappes souterraines dont dépendent plus de deux millions d'habitants dans la vallée de Toluca.

## 2.5. Données et méthodes utilisées dans notre analyse

### 2.5.1. Digitalisation des polygones d'activité minière

L'identification des polygones d'activité minière a été effectuée avec le logiciel Quantum Gis et son extension qui permet de créer des polygones avec l'affichage synchronisé d'image satellitaires de « Google Earth » (Figure 6). Les images satellitaires utilisées correspondent à des dates différentes et leur précision de localisation peut être questionnable. Il aurait été préférable d'acquérir des images satellitaires spécifiquement pour les besoins de ce projet. Mais le coût de ces images satellitaires sur de telles surfaces aurait été élevé et il ne se justifiait pas pour cette recherche à caractère exploratoire.

Il n'en reste pas moins que l'information produite à partir de ces images Google Earth est d'une grande utilité pour identifier les sites illégaux. La précision de cette information est largement suffisante à ce stade pour analyser la distribution spatiale de ces sites d'extraction.

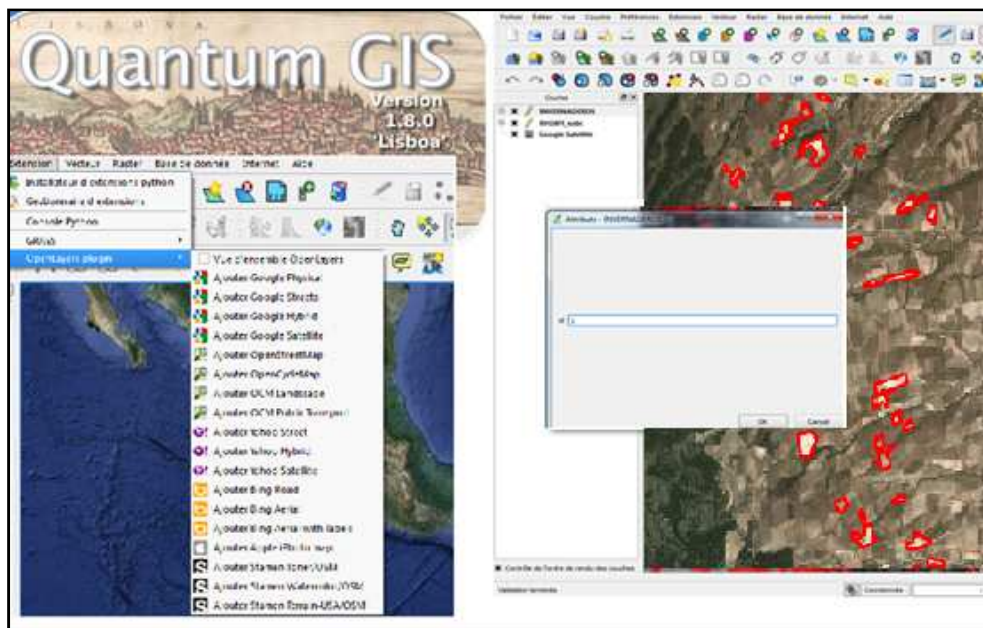


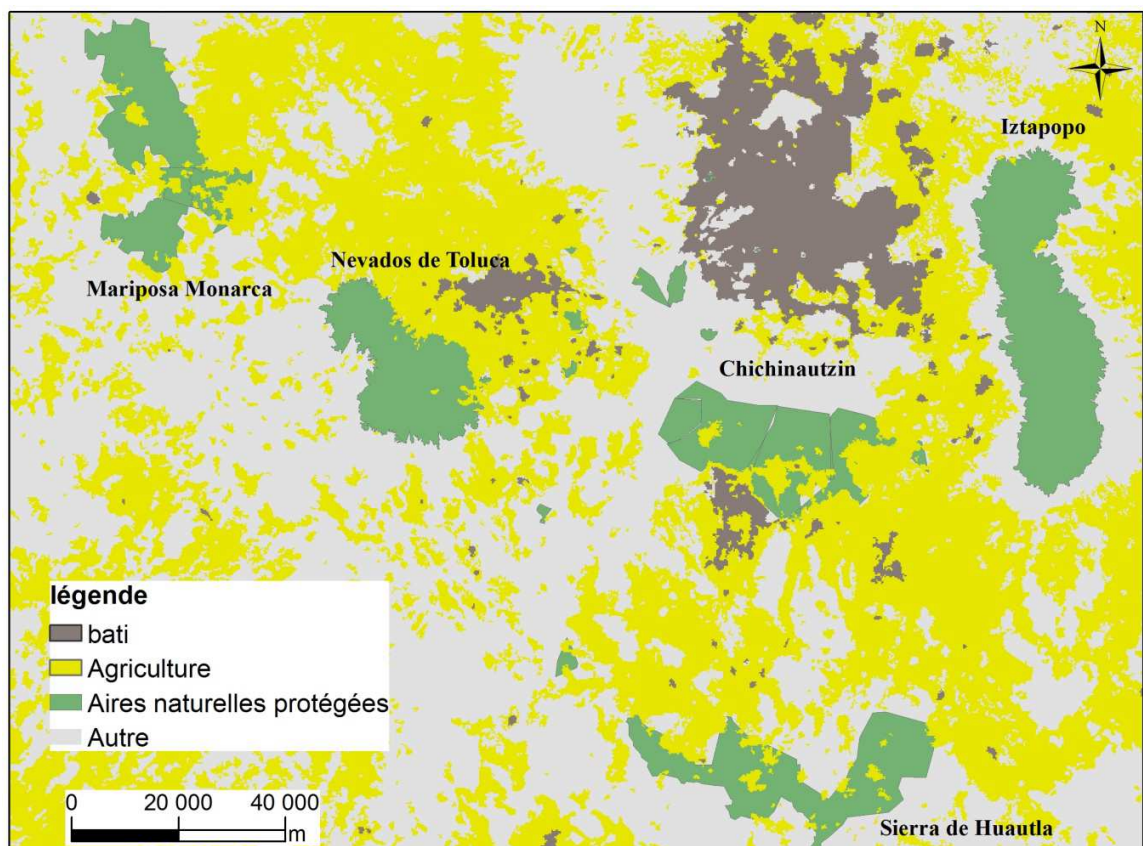
Figure 5: Application Quantum Gis et sur la digitalisation de serres  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### 2.5.2. Données de base et facteurs pour l'analyse de l'activité extractive

Les données de base

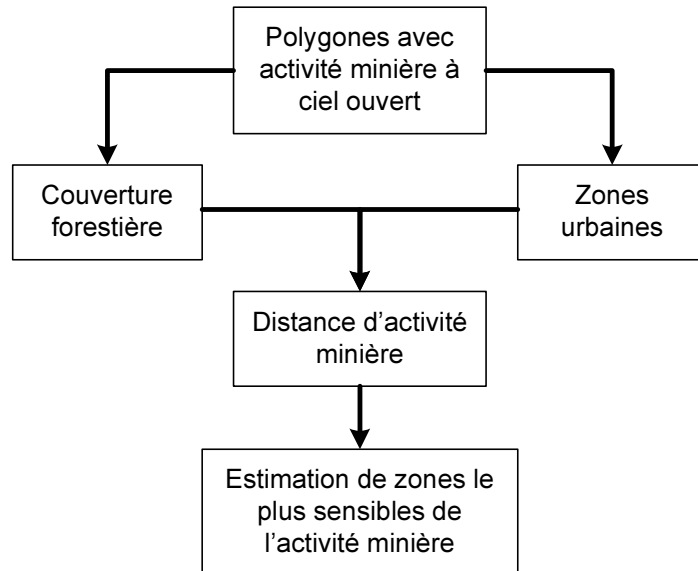
Utilisées proviennent de l'Institut national de la statistique et de géographie du Mexique (INEGI) et de la Commission Nationale pour la Biodiversité (CONABIO).

Pour le calcul de la distance à la forêt, nous n'avons considéré dans les couches de forêt de l'INGEI que les forêts denses. L'image ci-dessous présente la carte de la couverture forestière utilisée (Figure 7).



**Figure 6: utilisation des terres dans l'axe central volcanique**  
Source: Antonio Villanueva, 2013. D'après INEGI. <http://www.inegi.org.mx>

Pour identifier les zones d'extraction minière les plus sensibles, nous avons suivi le schéma d'analyse suivant.



**Figure 7: Schéma d'analyse pour identifier les sites d'extraction minière les plus sensibles**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

Ce cheminement logique, permet de croiser les zones de forte concentration d'activité minière leur distance à la forêt et à la ville.

Ces différents facteurs sont définis dans le Tableau 2 suivant.

<b>Variables</b>	<b>Description</b>
<b>Densité de la superficie avec l'activité minière</b>	Densité des points identifiés avec des images de GoogleMaps. L'unité de mesure utilisée est le nombre de mines dans un rayon de 1.000 m.
<b>Distance de la forêt dense</b>	Distance concentriques, des forêts denses, en l'an 2005, du PNNT aux mines identifiées. L'unité de mesure est la zone d'influence ou « Buffer » en mètres
<b>Distance de l'aire urbaine</b>	Distances concentriques de zones urbaines consolidées à l'an 2010 proches du PNNT. L'unité de mesure a été zones d'influence ou « Buffer » en mètres

**Tableau 2: Description des Variables.**

Source: Antonio Villanueva, 2013.

### ***2.5.3. Quantification des facteurs de l'analyse***

#### ***2.5.3.1.***

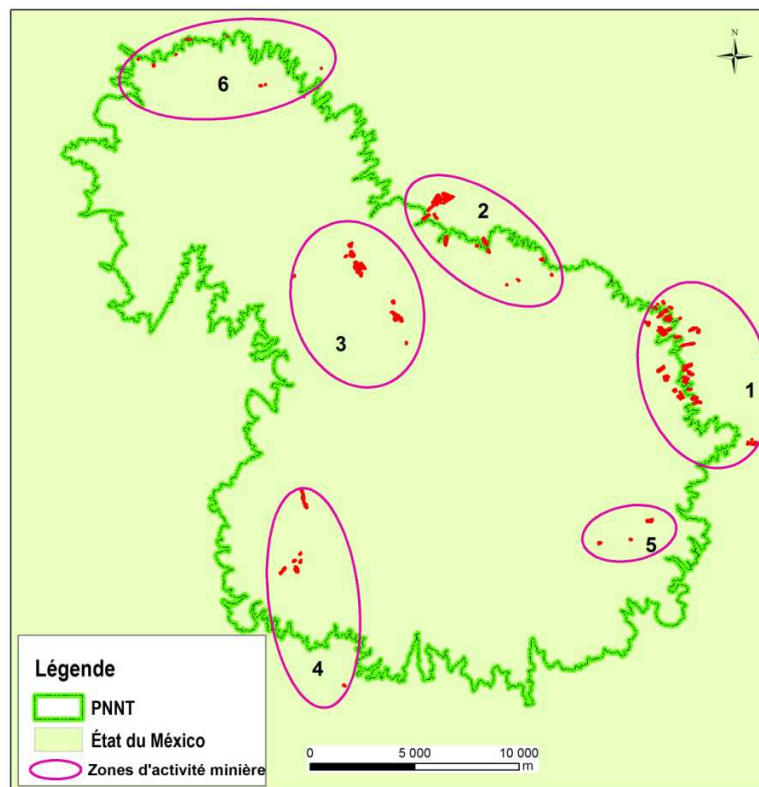
Par calculer la densité de l'activité minière, nous avons utilisé le logiciel ArcGis10 avec son outil 'densité de points' disponible dans l'extension « analyse spatiale ». En positionnant un point au centre de gravité de chaque polygone (site d'extraction), l'outil calcule pour chaque point le nombre de points voisins dans un cercle de rayon 1.000 m.

Pour calculer la proximité de la forêt à chaque site d'extraction, l'outil « proximity » de l'extension « analyse spatiale » du logiciel ArcGis10 a été utilisé. Ces calculs de proximité ont été réalisés par pas de 1.000 m jusqu'à une distance maximale de 10.000 m. Le même outil a été utilisé pour calculer la distance des zones urbaines. Le pas est de 1.000m et la distance maximale est de 14.000 m.

## 2.6. Résultats et discussion

### 2.6.1. Localisation des sites d'extraction minière

La surface totale des sites identifiés dans le PNNT et à sa périphérie (Figure 9 et Table 4) par photo-interprétation sur les images Googleearth de 149 ha. En tout, 6 zones sont identifiées. La zone où l'activité extractive est la plus importante se trouve à l'Est du Parc, et elle couvre 60 ha (zone 1). La zone où l'activité est la plus faible se trouve au nord-ouest du Parc et couvre 1,69 ha (zone 6).



**Figure 8: Zones d'activité extractive minière**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

Zone d'activité minière	Surface en ha
1	60,9
2	39,2
3	30,4
4	12,1
5	4,5
6	1,92

**Tableau 3: Zones d'activité extractive minière**  
Source : antonio Villanueva, 2013

### 2.6.2. Densité d'activité minière

La distribution de la densité d'activité minière est illustrée par la Figure suivante (Figure 10). Nous pouvons observer que cette activité se concentre à la périphérie immédiate du Parc, mais qu'elle existe aussi à l'intérieur du Parc.

L'activité minière se concentre sur les versants Est et Nord du Parc. Cela correspond aux zones 1 et 2 de la Figure 10. À l'inverse, la zone Sud du Parc a une faible activité minière.

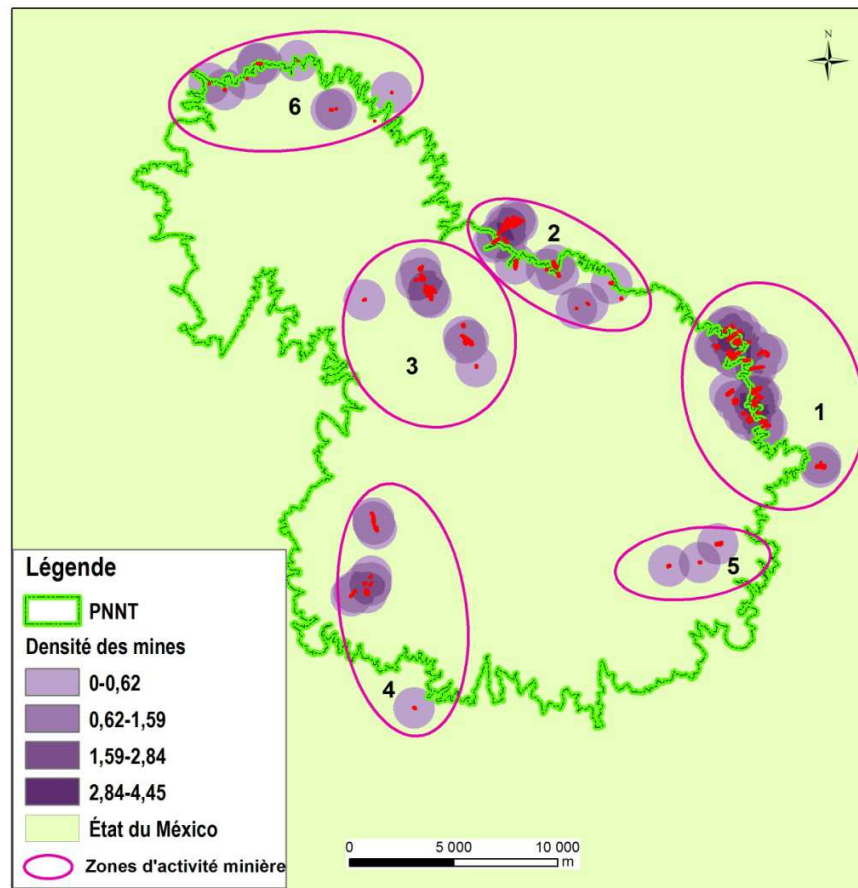


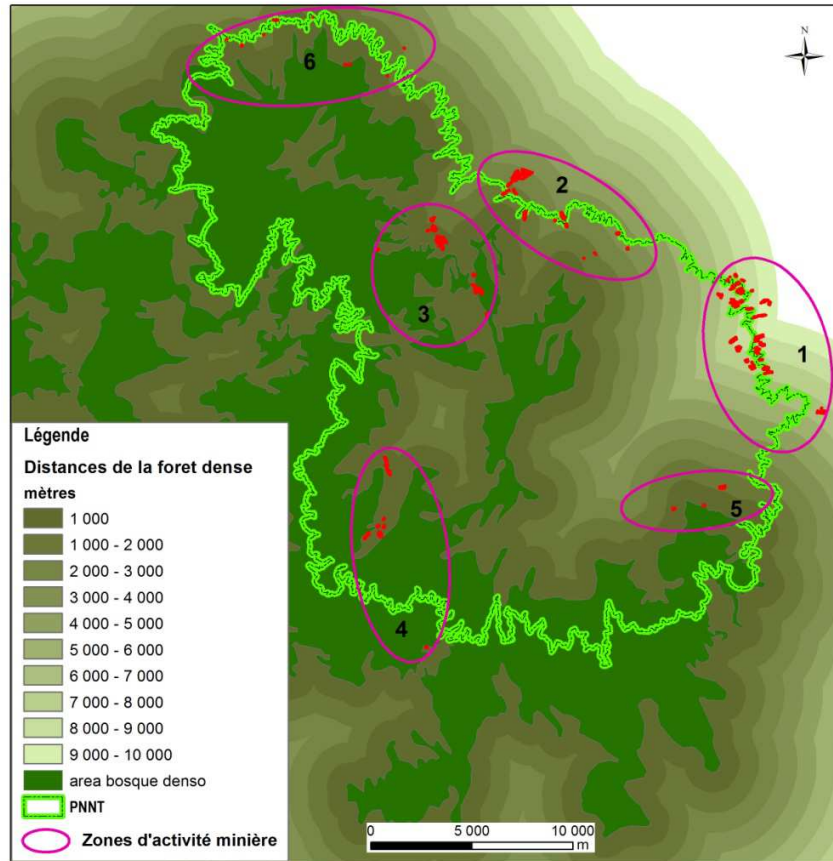
Figure 9: Densité de l'activité minière  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### 2.6.3. Distance à la couverture forestière dense

La mesure de la distance a été calculée sur des zones d'influence ou « buffer » de 1.000 mètres de distance. Les sites d'extraction les plus proches de la forêt se situent dans les zones 3, 4, 5 et 6 (Figure 11). Elles sont à moins de 1.000 m de distance et dans certains cas

elles sont même à l'intérieur de la forêt (zone 3 et 4). Dans ces deux dernières zones, la surface des sites d'extraction minière est au total de 10 ha .

La zone la plus distante de la forêt (zones 1 et 2) est aussi celle qui a la plus forte densité de sites d'extraction. En revanche, les zones les plus proches de la forêt ont une faible densité de sites d'extraction (zones 3, 4, 5 et 6).

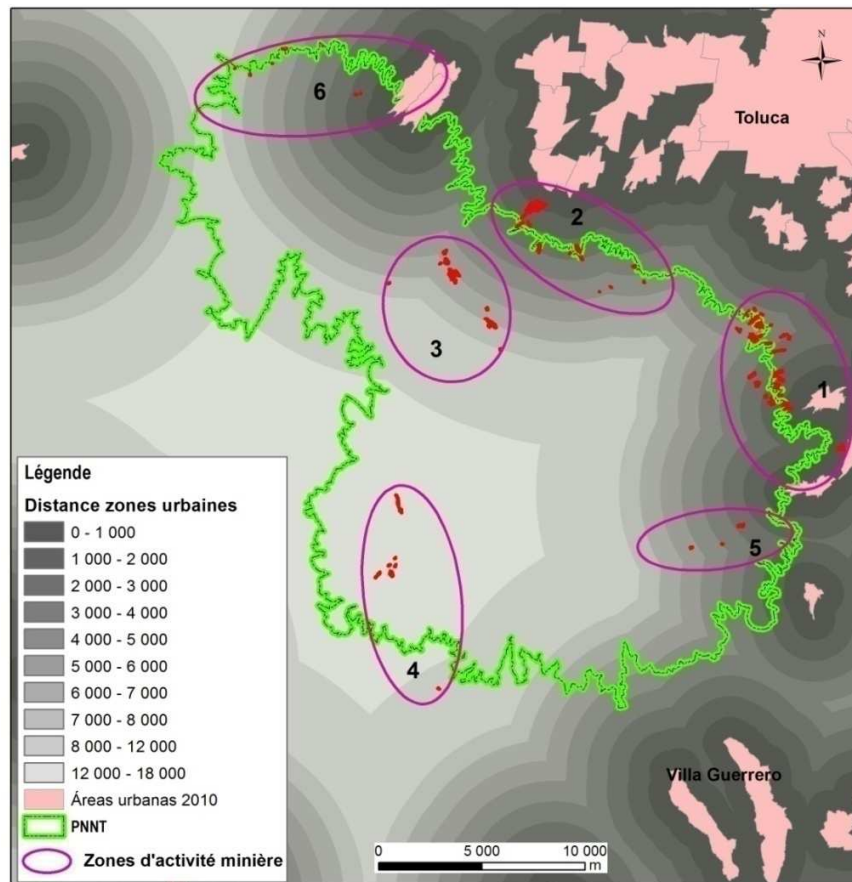


**Figure 10: Distance des sites d'extraction minière à la forêt**  
Source : Antonio Villanueva, 2013



#### 2.6.4. Distance aux espaces urbaines

Les deux zones qui concentrent la plus importante surface de sites d'extraction et ont la plus forte densité de sites (zones 1 et 2) sont aussi les plus proches des zones urbaines. Elles se trouvent à moins de 4 km d'un espace urbanisé (Figure 12) et montrent qu'il existe une relation de proximité entre les espace urbains et la localisation des zones minières. De plus, nous pouvons remarquer que ces zones 1 et 2, proches de la ville, sont éloignées de la forêt. Cette relation entre l'importance et la densité de l'activité minière et la ville s'explique en grande partie par le type de matériaux extraits (rappelons qu'il s'agit de matériaux de construction) et par l'accessibilité facilitée par un réseau routier dense.



**Figure 11: Distance des zones urbaines**

Source : Antonio Villanueva, 2013

### **2.6.5. Evolution des sites d'extraction minière.**

Nous avons pris trois exemples pour illustrer l'évolution de l'activité minière.

- la récupération entre 2006 et 2013 d'un site d'extraction pour être affecté à l'agriculture.
- L'extension d'un site d'extraction au détriment d'une parcelle agricole.
- \_ La sous utilisation des terres agricoles, par l'activité minière.

#### **2.6.5.1.**

Le premier exemple (Figure 13) est situé dans la localité de "Santa Cecilia", sur les limites du Parc. Cet exemple nous montre une intense activité minière en 2006, tandis qu'en 2013 cet espace est cultivé. Il illustre la possibilité de réhabiliter un site d'extraction dégradé.

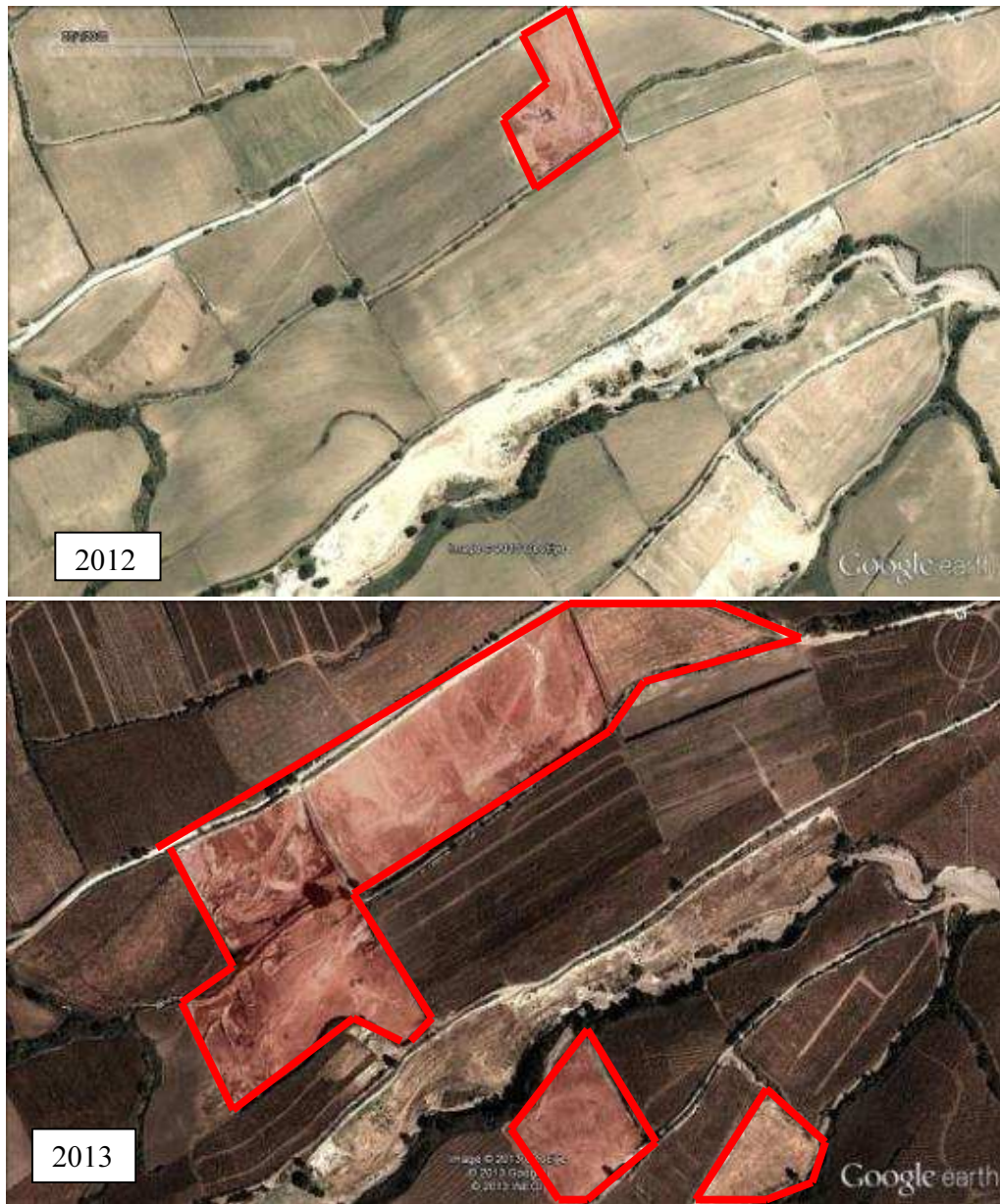




**Figure 12: Exemple de la récupération d'un site pour l'agriculteur entre 2006 et 2012.**  
Source: Antonio Villanueva, 2013 basée aux images extraits de Google Earth 2006 et 2013

Dans le deuxième exemple (Figure 14), des parcelles agricoles proches de la localité de “Zaragoza de Guadalupe sont converties à l’exploitation minière entre 2012 et 2013. En effet, en 2012, l’activité minière était déjà active (délimitée en rouge sur l’image de l’année 2012) mais peu étendue.

Par contre, sur l’image de l’année 2013, des parcelles agricoles entières ont été décapées pour exploiter les sables et graviers.

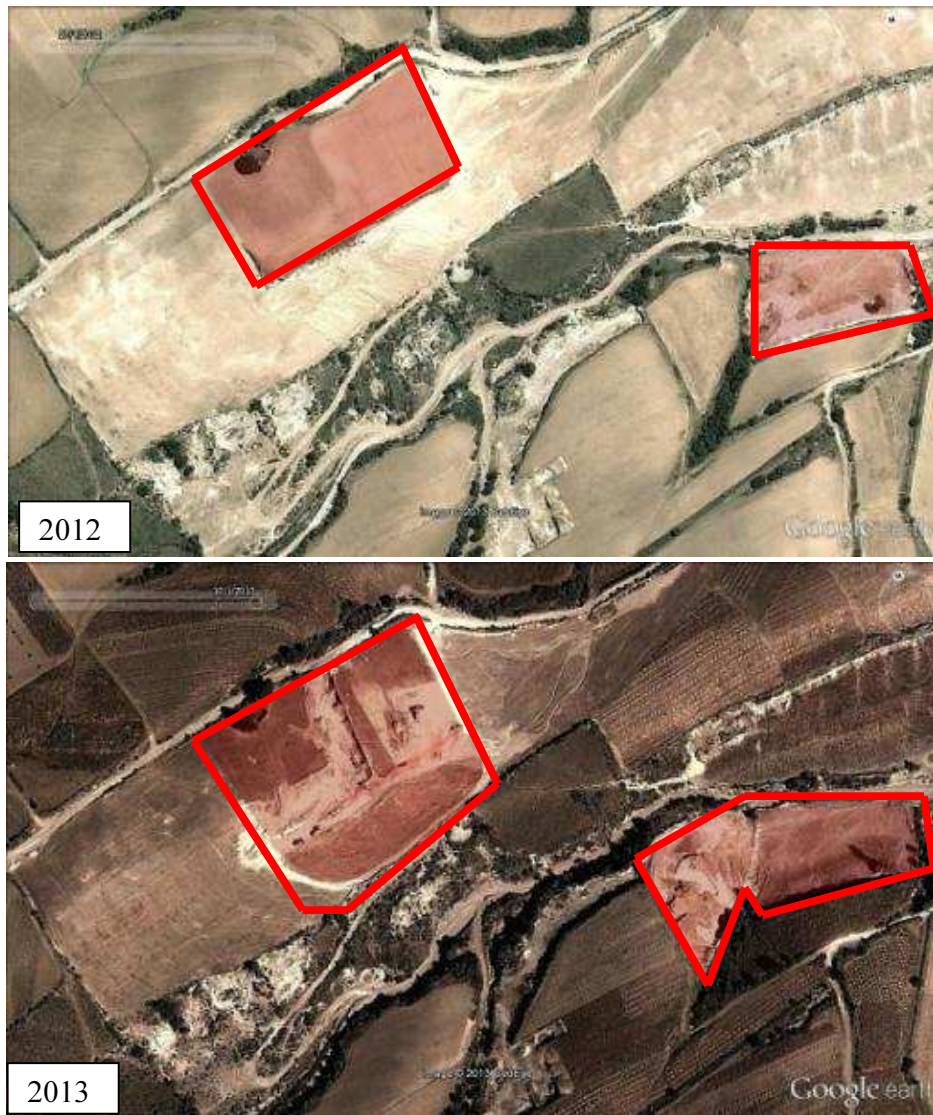


**Figure 13: exemple de l’extension de l’activité minière sur des parcelles agricoles entre 2012 et 2013**

Source: Antonio Villanueva, 2013 basée aux images extraits de Google Earth 2012 et 2013

### 2.6.5.2.

Enfin sur le dernier exemple (Figure 15), deux sites d'extraction s'étendent progressivement sur les parcelles agricoles où ils se situent. Là aussi, le pas de temps est court, puisque ces images datent respectivement de 2012 et 2013.



**Figure 14: Extension de l'activité minière sur des parcelles agricoles entre 2012 et 2013**  
Source: Antonio Villanueva, 2013 basée aux images extraits de Google Earth en 2012 et 2013.

Les photos de ces parcelles (Figure 16) montrent l'activité d'extraction dans les parcelles agricoles (coordonnées GPS : 99°39'53.46"O; 19° 8'48.11"N).



**Figure 15: photos de sites d'extraction monières en 2012**  
Source: Jacques Imbernon, registre de terrain année 2012

### **2.6.6. Discussion**

Cette étude sur l'activité minière dans et autour du Parc Nevado de Toluca montre l'urgence d'agir efficacement pour lutter contre cette pression sur le Parc du Nevado. Elle permet d'identifier

6 zones d'activité minière. Les zones où l'activité est la plus importante en surface et la plus dense en sites extractifs sont situées non seulement à proximité des aires urbaines (proche de l'extrême sud de la ville de Toluca), mais aussi à bonne distance des forêts. Les zones 3 et 4, lesquels sont à moins de 1.000 mètres de la forêt et sont situées à l'intérieur du PNNT où l'activité minière est interdite.

De plus, malgré l'interdiction d'exploiter des mines dans le PNNT, l'évolution observée sur quelques exemples nous montre une augmentation de l'activité et la conversion illégale de terres pour extraire des matériaux de construction.. Cela crée des dommages environnementaux comme l'érosion des sols. Ces dommages sont localisés principalement dans les communes de Zinacantepec, Toluca, Temascaltepec et Calimaya où l'activité minière représente 84% de la superficie totale des sites d'extraction observés dans et à la périphérie du Parc.

La principale limite de ce travail est le manque de validation sur le terrain. Malgré cette limitation, les résultats permettent de mettre en évidence l'ampleur de cette activité illégale, cachée parfois à l'intérieur du Parc lui-même.

### **3. La floriculture. De l'eau du Nevado pour des fleurs** **d'exportation à des rivières contaminées mettant en** **danger la santé humaine.**

L'activité agricole ornementale dans le bassin versant de la rivière Amacuzac, liée au Parc National Nevado de Toluca, impacte négativement la biodiversité de cette zone. Dans ce chapitre nous mettrons en évidence l'extension et les effets de cette importante activité économique, face aux objectifs de conservation de la biodiversité qu'affichent les autorités publiques mexicaines pour préserver la richesse endémique de la biodiversité.

C'est à l'échelle d'un bassin versant de la rivière Amacuzac que cette analyse cherche à caractériser et hiérarchiser les zones de production horticole, selon deux facteurs : la consommation en eau d'irrigation en provenance du Nevado et l'utilisation de pesticides nocifs pour la santé humaine.

#### **3.1. Problématique de l'étude**

L'agriculture horticole dans cette région a débuté il y a plus de 70 années dans l'État de Mexico mais elle a pris une réelle importance depuis les années quatre-vingt. Au cours de ces 10 dernières années, le taux de croissance annuel de la production horticole a été d'environ 10%. A l'heure actuelle, il existe de nombreuses petites exploitations familiales. Mais de grandes entreprises exportatrices sont présentes et 9 d'entre elles dominent le secteur (Lara, 1997) (Garcia, 1999) (Orozco, 2007). La valeur marchande de cette production atteint environ 20 millions de dollars par an. Ce boom économique du secteur contraste avec la vulnérabilité sociale de la main-d'œuvre locale. *"...Le faible coût de la main d'œuvre est un notable désavantage économique pour les travailleurs... les bas salaires ne sont pas favorables à l'amélioration des conditions de vie des travailleurs"* (Orozco, 2007).

De plus, le secteur de la floriculture génère une contamination des sols et des eaux par l'utilisation de pesticides toxiques pour la santé. Il y a donc autour de cette production un conflit d'intérêts entre la production horticole et la conservation de l'environnement. Et ces impacts sur l'environnement ont un effet négatif sur le bilan des biens et services qu'offre le Parc Naturel Nevado de Toluca, tant au niveau de la régulation hydrique que de la santé des populations.



La question de la santé humaine de ces populations sous l'effet de ces pesticides est en effet un enjeu majeur. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2010) définit un pesticide comme « toute substance ou mélange de substances destinées à prévenir, détruire ou contrôler tout ravageur, donc la définition de pesticide, rassemble un groupe de composés avec les caractéristiques chimiques et biologiques hétérogènes ». Or l'application de pesticides chimiques constitue un risque important pour la santé des populations qui sont exposées directement ou indirectement. Leurs effets peuvent se faire sentir à une grande distance de leur lieu d'utilisation et les dommages sur la santé humaine peuvent être irréversibles (Otero, et al., 2000) (Cavieres, 2004).

Avec des marchés urbains à proximité (Mexico DF, Toluca, Cuernavaca) et des ressources hydriques abondantes en provenance du Nevado de Toluca, cette zone du Mexique est bien adaptée à la culture de fleurs. L'activité horticole ornementale dans cette région est de fait la plus importante du pays. L'État du Mexique représente 80% des exportations de fleurs depuis le Mexique vers les États-Unis, le Canada et les pays européens. La seule commune de Villa Guerrero représente 56% de la production de l'État (Gomora, et al., 2005), et des chiffres plus récents lui attriburaient même ent 73% de la production nationale (H.ayuntamiento de Villa Guerrero, 2008).

Dans ce contexte, il était important de mieux caractériser l'importance de cette activité en termes de surfaces occupées par les serres, et d'estimer les conséquences sur la consommation et la contamination des eaux en provenance du Parc National Nevado de Toluca.

Compte tenu du temps disponible pour l'étude, cette analyse porte sur **le bassin versant de la rivière Amacuzac et la population des localités et communes situées dans ce bassin versant.**

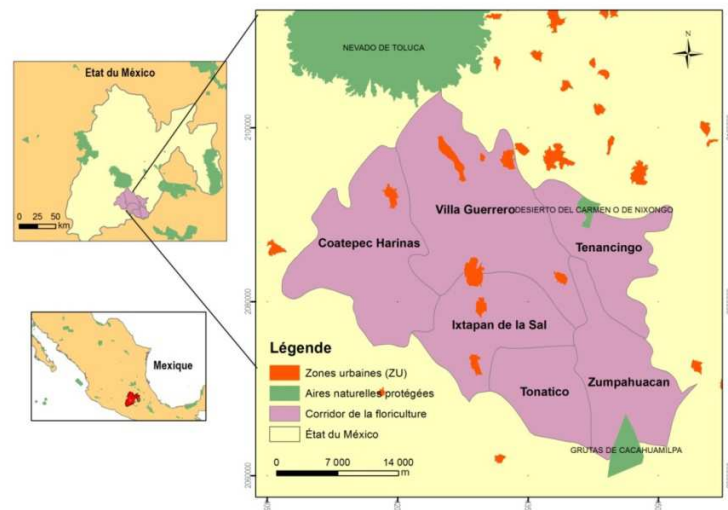
### 3.2. Objectifs de la recherche

L'objectif principal de ce travail est de déterminer les espaces où la pression sur la ressource en eau par la floriculture sous serres est la plus importante et d'identifier les centres de peuplement les plus exposés aux risques de pollutions par les pesticides utilisés par ce type d'agriculture. Nous déclinons cet objectif de la façon suivante :

- Identification et digitalisation de la surface occupée par des serres à l'intérieur du bassin versant de la rivière Amacuzac.
- Estimation de la consommation en eau par la floriculture et identification des zones les plus consommatrices.
- Estimation des quantités de pesticides appliquées par cette floriculture sur le bassin versant.
- Identification des centres peuplés du bassin versant qui sont les plus exposés à la pollution par les pesticides.

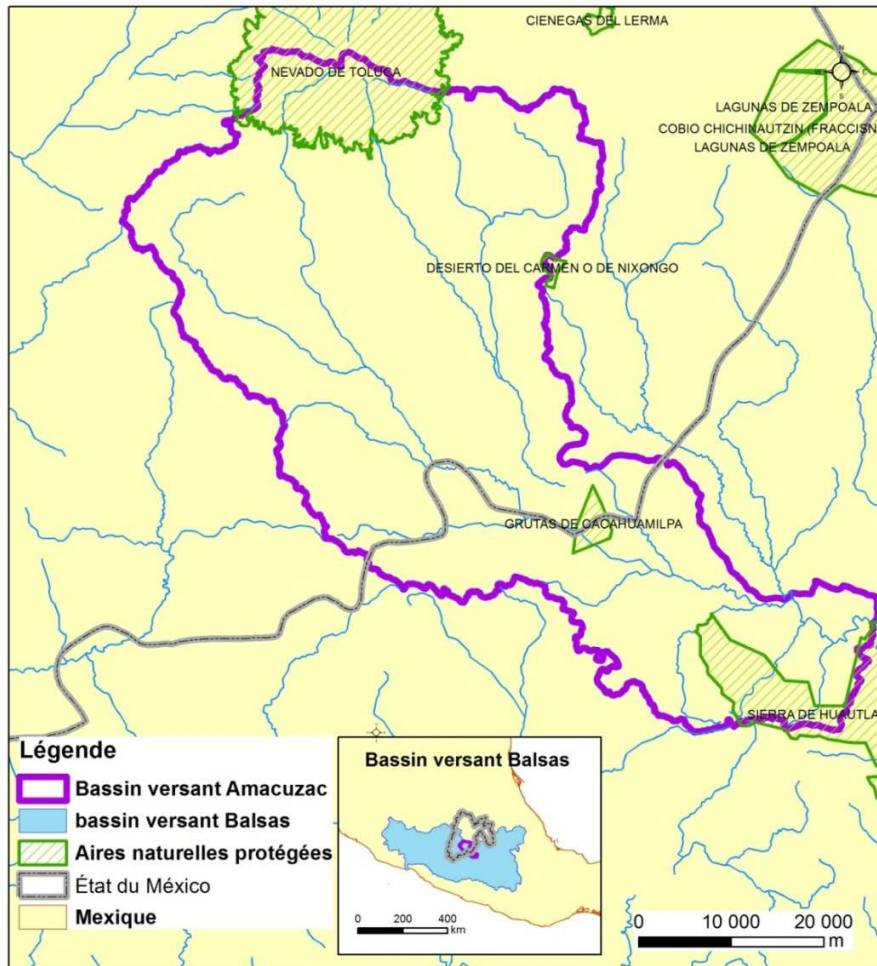
### 3.3. Zone d'étude.

Dans l'État de Mexico, la floriculture est concentrée dans « le corridor de la floriculture » (Figure 17) qui est composé des communes de Tenancingo, Coatepec Harinas, Ixtapan de la Sal, Tonicato, Zumpahuacán, et Villa Guerrero. Dans ce corridor sont cultivés environ 5.547 hectares de fleurs (Gomora, et al., 2005).



**Figure 16. Le corridor de la floriculture dans l'État de Mexico**  
Source : Antonio Villanueva, 2013, d'après CONABIO, 2010

La zone d'étude correspond à l'ensemble des micro-bassins versants en amont de la rivière Amacuzac, qui est elle-même un sous-bassin de la rivière Balsas (Figure 18). Cette zone se situe au pied du Nevado et elle a une influence directe sur la régulation des services écosystémiques du secteur sud du Parc National Nevado de Toluca.



**Figure 17: Localisation du bassin versant Amacuzac**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013, d'après CONABIO, 2010

### 3.4. La floriculture dans l'Etat du Mexique

Le marché des fleurs dans l'État du Mexique est un marché important et dynamique. Plus globalement au niveau mondial il représente actuellement autour de 38 milliards de dollars par an et son taux de croissance annuel approche les 6% (Páez, et al., 2011). Il est donc important de contextualiser cette activité horticole pour l'État de Mexico où nous nous situons, tant du point historique, qu'économique, environnemental et social.

#### 3.4.1. *Un peu d'histoire sur la floriculture dans l'Etat de Mexico.*

La floriculture est une tradition dans les familles rurales de l'État de Mexico. Mais elle a commencé à se développer réellement et à être commercialisée entre les années 1940 et 1950, avec la production en 'pleine terre' d'espèces comme le *Gladiolus* (gladiolos) ou le *Cheiranthus cheiri* (alhelí), qui correspondaient à une forte demande du marché national. Plus tard, durant les années 70, profitant du climat favorable de la zone et de l'expérience locale en floriculture, sont arrivées des familles japonaises (Matsumoto et Kano Tachica) qui ont introduit dans la commune de Villa Guerrero de nouvelles variétés commerciales.

Dans les années 90, la floriculture au Mexique a profité des traités de libre commerce signés avec les Etats-Unis et le Canada, qui ont dynamisé les exportations. Pendant cette décennie, la surface cultivée en fleurs au niveau national est passée de 3.000 à 13.000 hectares (Lara, 1997) (Orozco, 2007).

La vente et l'exportation des fleurs par les grandes entreprises se réalisent souvent par l'intermédiaire d'Internet, alors que les petits producteurs vendent leurs produits avec une plus faible rentabilité à des intermédiaires ou sur les marchés locaux. Il est important de souligner qu'il existe là une relation parfois très étroite entre grands et petits producteurs, puisque ces derniers approvisionnent par le biais d'intermédiaires les grands producteurs exportateurs qui de cette manière 'externalisent' une partie de leurs coûts de production.

### 3.4.2. La dimension économique de la floriculture

Les principales zones productrices de fleurs du pays sont localisées aux alentours de la mégapole de Mexico (État de Mexico, Morelos et District Fédéral), avec environ 7 790 hectares (Tableau 5). L'État de Mexico, à lui seul, représente 77% de cette surface, avec un total de 5.990 hectares (Tableau 5) (Estado de México, 2011).

État	Superficie (Has)	%
<b>Mexico</b>	5.990,80	36,83%
<b>Puebla</b>	3.687,78	22,67%
<b>Morelos</b>	1.634,40	10,05%
<b>Jalisco</b>	928,18	5,71%
<b>Michoacán</b>	753,00	4,63%
<b>San Luis Potosí</b>	732,50	4,50%
<b>Veracruz</b>	636,00	3,91%
<b>Baja California</b>	597,50	3,67%
<b>Guerrero</b>	560,70	3,45%
<b>Distrito Federal</b>	162,50	1,00%
<b>Autres</b>	583,70	3,59%
<b>Total</b>	16.267,06	100.%

**Tableau 4: Principaux états producteurs de fleurs au Mexique en 2008**

Source: Conseil mexicain de la Fleur A C, 2008

C'est dans le sud de l'État de Mexico que se trouve la zone productrice de fleurs la plus grande du pays, puisqu'elle représente 85% des surfaces de serres et 90% des surfaces totales en floriculture de l'Etat. Parmi les communes les plus importantes pour la floriculture, on trouve Villa Guerrero, Coatepec Harinas, Tenancingo, Zumpahuacán, Malinalco et Ixtapan de la Sal (Estado de México, 2011)

En 2009, les principales cultures de fleurs produites dans l'Etat de Mexico étaient *Gladiolus communi* (Gladiola) et *Chrysanthemum* (Crisantemo), qui à elles seules représentaient 50% des surfaces cultivées (Estado de México, 2011). Selon cette même source, la valeur de la production floricole dans l'État de Mexico était de 381 Millions de Dollars américains, avec une surface cultivée de 6,740 hectares (Estado de México, 2011).

### 3.4.2.1. *Marché national*

Sur le marché national les principaux acheteurs sont des exportateurs, des distributeurs, des magasins self-service, des paysagistes, des parcs et jardins municipaux, des hôtels et restaurants et des particuliers. La demande nationale est concentrée dans le Nord de la République : 60% (Nuevo León, Sinaloa, Basse Californie, Sonora, Coahuila, Chihuahua) ; le Sud de la République : 25% (Quintana Roo, Oaxaca, Yucatán, Tabasco, Chiapas, Veracruz); le Centre de la République : 15% (District Fédéral, Puebla, Querétaro, Guanajuato, Hidalgo). (Estado de México, 2011) (Figure 19)



**Figure 18: Marché local dans l'État de Mexico**  
Source: (Imbernon, Travail de terrain 2012)

### **3.4.2.2. Exportations**

Les exportations mexicaines se concentrent approximativement à 85% sur le marché américain, loin devant le Canada, l'Allemagne et le Japon. Dans l'État de Mexico, la *Rosa* (rose) est la fleur qui eu la plus grande expansion ces dernières années, en particulier pour ces marchés extérieurs (Estado de México, 2011).

Les grands exportateurs de fleurs sont de grandes entreprises soutenues par des groupes d'investisseurs. Ce sont elles qui produisent les plus grands volumes de fleurs destinées à l'exportation. Ces entreprises sont soumises à de nombreuses normes requises pour exporter leurs produits et un grand nombre de démarches administratives pour importer des intrants et du matériel végétatif. (Gomora, et al., 2005)

Dans l'État de Mexico les exportations sont aux mains de neuf entreprises, lesquelles sont localisées dans les communes de Coatepec Harinas, Zumpahuacán, Tenancingo et Villa Guerrero. Les deux plus grandes entreprises sont localisées à Villa Guerrero, dans notre zone d'étude. Il s'agit de Visaflor S.A de C.V. et de Multivía S.A de C.V. Ces deux entreprises ont plus de 50 hectares de serres pour la production floricole et exportent en Allemagne, au Canada, aux Etats-Unis d'Amérique, en Italie, au Japon, en Espagne, en France, en Hollande et en Suisse. (Orozco, 2007)

### **3.4.3. La dimension sociale de la floriculture.**

dans l'État de Mexico, il existe environ 10.000 cultivateurs de fleurs en 'plein champ' et entre 100 et 150 producteurs sous serre, qui occupent environ 600 hectares. La commune de Villa Guerrero, dans l'état de Mexico, concentre 70% de la floriculture d'exportation (Orozco, et al., 2009).

Les conditions sociales des producteurs de fleurs dans l'état de Mexico sont diverses. Orozco (2007) définit 5 groupes de producteurs, depuis les entreprises qui concentrent le marché d'exportation jusqu'aux petits agriculteurs qui peinent à subsister. Pour sa part, Gomora (2005) classe les producteurs en trois groupes : les grandes entreprises, les entreprises moyennes et les petits producteurs. Dans les deux cas, les analyses placent les petits agriculteurs comme un groupe vulnérable économiquement. Ce groupe correspond aux petits floriculteurs traditionnels qui subsistent de leurs ventes à des intermédiaires ou sur les petits marchés locaux.

#### 3.4.4. La dimension environnementale de la floriculture

La floriculture dans la région souffre d'un sérieux problème : les insectes, maladies et champignons qui s'attaquent aux fleurs sont de plus en plus résistants aux traitements phytosanitaires et les quantités de pesticides utilisées pour les combattre sont de plus en plus importantes. Les conséquences pour l'environnement et pour la santé humaines deviennent de fait un problème crucial qu'il est absolument nécessaire de prendre en compte (2000AGRO, 2005).

De plus la consommation d'eau par la floriculture sous serre est énorme ; elle est estimée en moyenne entre 15 et 40 litres par semaine et par mètre carré. En hiver la consommation est moindre mais en été elle double. L'eau provient de dérivations d'eaux superficielles et de captages de sources (manantiales) ; elle est distribuée par un réseau de canaux et de tubes. A la parcelle, l'irrigation se fait le plus souvent par goutte à goutte (riego por tandeo) (Gomora, et al., 2005) (Figure 20). Toute l'eau consommée dans ce bassin versant Amacuzac provient du Nevado.



Figure 19 : Bassins de stockage de l'eau et canaux de distribution pour l'irrigation des serres  
Source: (Imbernon, Travail de terrain 2012)

L'utilisation de pesticides en forte quantité est liée à la demande des marchés pour des produits de grande qualité, à forte valeur esthétique. Mais il n'existe pas de contrôle des doses appliquées et de suivi des déchets toxiques (Gomora, et al., 2005). Parmi les principaux produits chimiques utilisés se trouve le Bromure de Méthyle. C'est un fumigène de sol de vaste spectre qui agit sur une grande quantité de champignons, insectes, broussailles, nématodes et acariens. Il a été utilisé pendant des années par les agriculteurs de nombreux pays (Pizano, 2002).



Des chiffres de l'Association mexicaine de l'industrie phytosanitaire (AMIFAC) indiquent que la zone de la floriculture de l'État de Mexico consommerait environ 150 tonnes par an de produits chimiques hautement toxiques pour la santé, L'impact environnemental et sanitaire d'une telle consommation par la floriculture serait donc extrêmement important.

### 3.5. Les impacts potentiels pour la santé humaine.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que chaque année entre 500.000 et 1.000.000 de personnes dans le monde sont empoisonnés par des pesticides et qu'entre 5.000 et 20.000 en meurent. Au moins 75% de ceux qui décèdent sont des travailleurs agricoles dont les niveaux d'éducation sont faibles. Mais force est de reconnaître que l'information sur les dangers de ces produits est limitée et que les réglementations sont souvent peu strictes ou même inexistantes.

Les effets sur la santé humaine sont variés : cela va des malformations congénitales, aux avortements prématurés et à des problèmes neurologiques. Des études ont révélé aussi des malformations des enfants dont les parents sont exposés aux pesticides (Valdez, et al., 2000) (Rojas, et al., 2000).

« En 1995 au Mexique, le volume de produits agrochimiques utilisés a atteint 54.000 tonnes dont 25.000 tonnes d'insecticides (47% du total), 16.000 tonnes d'herbicides, 9000 tonnes de fongicides et 4000 tonnes de divers autres produits » (Valdez, et al., 2000). Malheureusement, malgré cette très forte utilisation de produits agrochimiques, peu de rapports ont été publiés sur le sujet (Cavieres, 2004). En Europe, le Bromure de méthyle a été interdit en raison de ses effets sur la santé humaine et sur la couche d'ozone. Au Mexique, ce produit continue à être utilisé en masse. Et particulièrement dans le cas spécifique de la floriculture, car « les consommateurs exigent des fleurs parfaites, sans tache sur les pétales et le feuillage ». (Observatorio Latinoamericano de Salud, 2005). Ces exigences de qualité pour les fleurs ont pour conséquence un risque très élevé pour la santé des travailleurs et des habitants de ces zones agricoles (Figure 21).



Figure 20: Quelques produits agrochimiques utilisés sur les cultures de fleurs  
Source : (Imbernon, Travail de terrain 2012)

Dans le tableau ci-dessous on peut voir les produits les plus utilisés en Amérique latine pour les cultures des fleurs et leur classification par niveau de toxicité. Le niveau rouge correspond aux produits les plus toxiques pour la santé humaine, et les verts aux moins toxiques (Tableau 6). Le bromure de méthyle apparait comme un produit à très forte toxicité.

Produit agrochimique	Groupe chimique	Niveau de toxicité
<b>Hidrocloruro de propamocarb</b>	Carbamato	Vert
<b>Methiocarb</b>	Carbamato	Jaune
<b>Metomil</b>	Carbamato	Rouge
<b>Diazimon</b>	Organofosforado	Jaune
<b>Tiociclamhidro genozalato</b>	Nerehistoxina	Jaune
<b>Bromure de méthyle</b>	Bromure de méthyle	Rouge

**Tableau 5: La toxicité des principaux produits agrochimiques utilisés dans la culture de fleurs**  
 Source: (Observatorio Latinoamericano de Salud, 2005)

## 3.6. Données et méthodes utilisées dans notre analyse

### 3.6.1. Digitalisation des polygones de serres

L'identification des polygones correspondant aux serres dans le bassin Amacuzac a été effectuée avec le logiciel Quantum Gis et une extension qui permet de synchroniser avec Google Maps (Figure 22). Ce choix d'utiliser les images Google se justifie par le caractère exploratoire de cette étude qui ne permettait de mobiliser d'autres images satellitaires ou photographies aériennes.

Ces images Google nous ont toutefois permis de créer une information sur l'extension et la localisation des serres de la floriculture dans cette zone qui n'existait nulle part ailleurs.

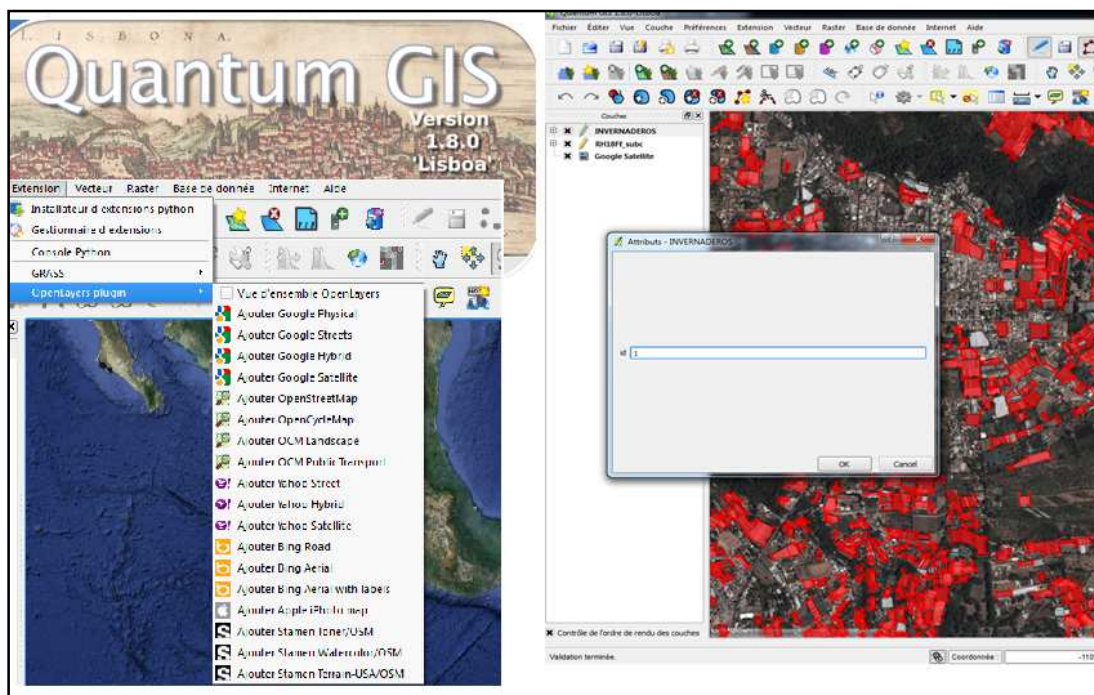


Figure 21: L'utilisation de Quantum Gis synchronisé avec GoogleEarth pour la cartographie des serres de la floriculture.

Source : Antonio Villanueva, 2013

### 3.6.2. Information de base pour la délimitation des micros bassins versants du bassin versant Amacuzac.

L'information officielle disponible à l'Institut national des Statistiques (INEGI) est insuffisante pour effectuer une analyse détaillée de ces micro-bassins versants. On a donc cherché à délimiter ces petits bassins versant à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) disponible sur le site web de CONABIO (Figure 23). Ce calcul des limites des micro-bassins a été réalisé avec le logiciel ArcGis10 et son application 'hydrology'. Il a permis d'estimer les surfaces de chaque micro-bassin versant.

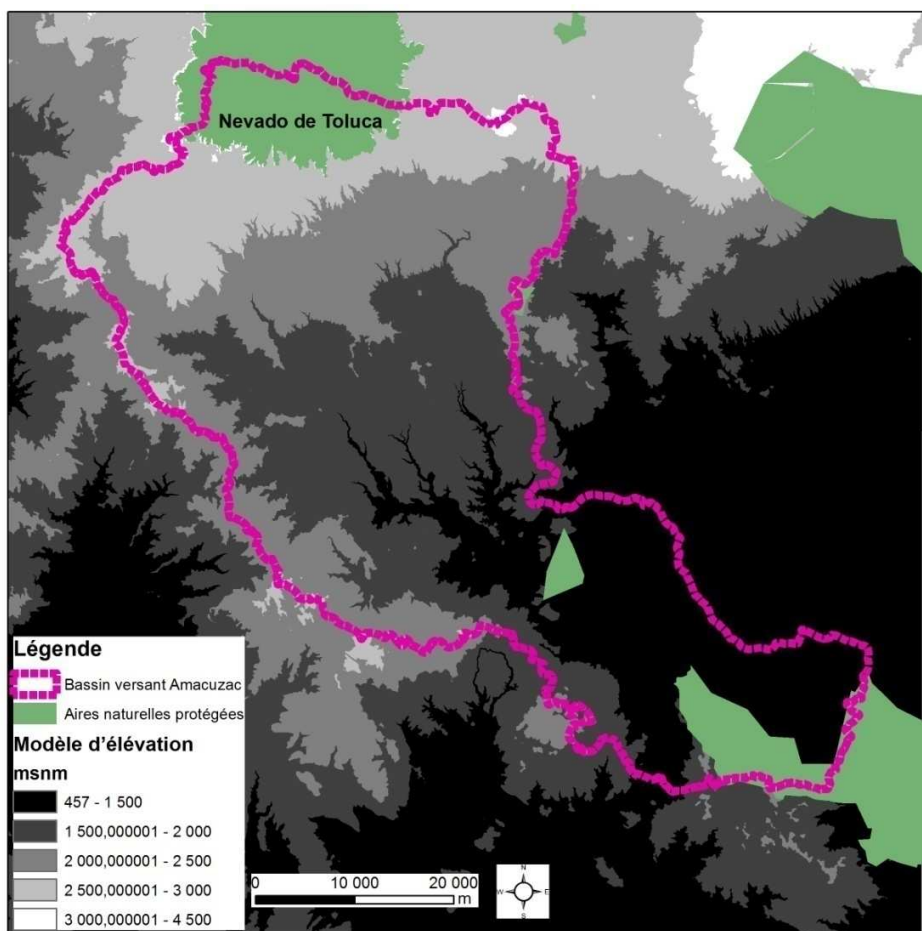


Figure 22: Le Modèle Numérique de Terrain utilisé sur la bassin versant Amacuzac  
Source: Antonio Villanueva, 2013. D'après INEGI. <http://www.inegi.org.mx>

Le modèle utilisé pour délimiter les micro-bassins versants à partir du MNT sous ArcGis 10 est le suivant (Figure 24):

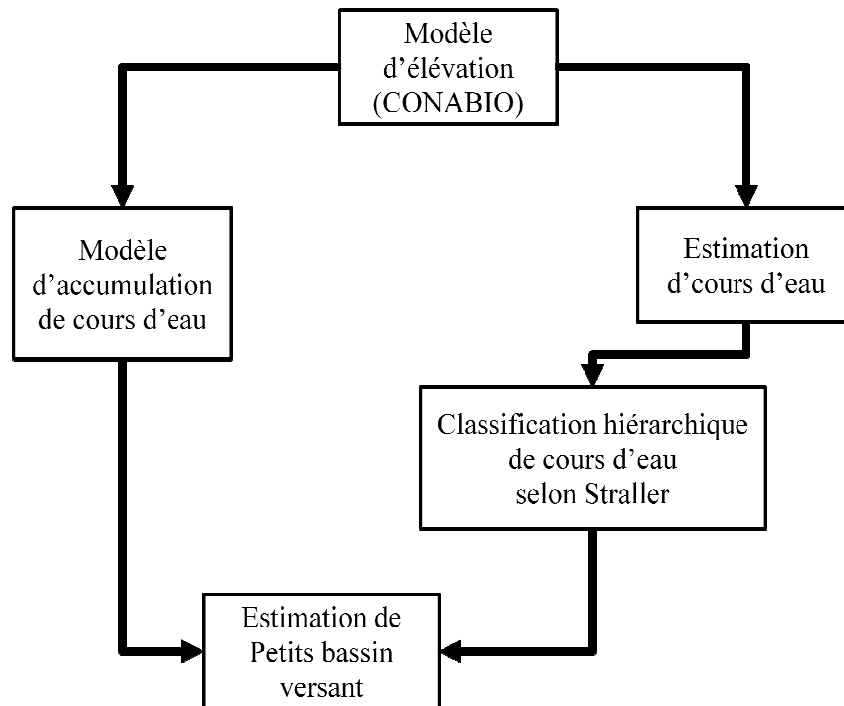


Figure 23: Schéma du modèle de calcul des micro-bassins versants  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### ***3.6.3. Estimation de la consommation en eau par la floriculture sur chaque micro-bassin versant***

L'irrigation des fleurs sous serre dépend de la saison, du stade végétatif de la culture (semis, montaison, floraison, récolte) et du type de fleur. La consommation moyenne sous serre est estimée à 27,5 litres par m<sup>2</sup> et par semaine (Páez, Hernández et Román 2011). Cette moyenne correspond uniquement à l'irrigation des fleurs et ne prend pas en compte la consommation humaine domestique. De fait la consommation totale en eau dans cette zone est sans doute bien plus importante. Et à l'avenir cette estimation devrait être vérifiée par un travail sur le terrain.

La formule utilisée est la suivante;

$$A_i = j \times a_i$$

*A<sub>i</sub>*: Consommation annuelle d'eau sur le micro-bassin versant *i* par la floriculture

*J* = 27,5(l) \* 52 (semaines) : Consommation d'eau annuelle moyenne par m<sup>2</sup> de serre

*a<sub>i</sub>*: surface en m<sup>2</sup> couverte en serres sur le micro-bassin versant *i*

### ***3.6.4. Estimation de la consommation de pesticides par micro-bassin versant***

L'estimation de la consommation de pesticides a été effectuée en ne considérant qu'un seul type de pesticide, le plus utilisée dans la floriculture au Mexique et à la fois un des plus dangereux pour la santé humaine : le Bromure de Méthyle. La valeur par hectare utilisée est de 350 kg par hectare de serre et par an (Cavieres 2004). Cette estimation n'est pas précise puisque ce n'est pas le seul pesticide qui est utilisé dans l'industrie des fleurs. Il n'existe pas non plus une vérification sur le terrain de ces valeurs estimées. C'est une première approche de la consommation d'un des pesticides les plus toxiques pour la santé humaine.

La formule utilisée est la suivante;

$$A_i = [350(kg)] \times [a_i]$$

Ou;

$A_i$ : Consommation de bromure de méthyle sur le micro-bassin versant  $i$

350(kg): Consommation moyenne de bromure de méthyle (kg) par année et par hectare de serre

$a_i$ : surface des serres sur le micro-bassin versant  $i$

### ***3.6.5. Le risque sur la santé humaine***

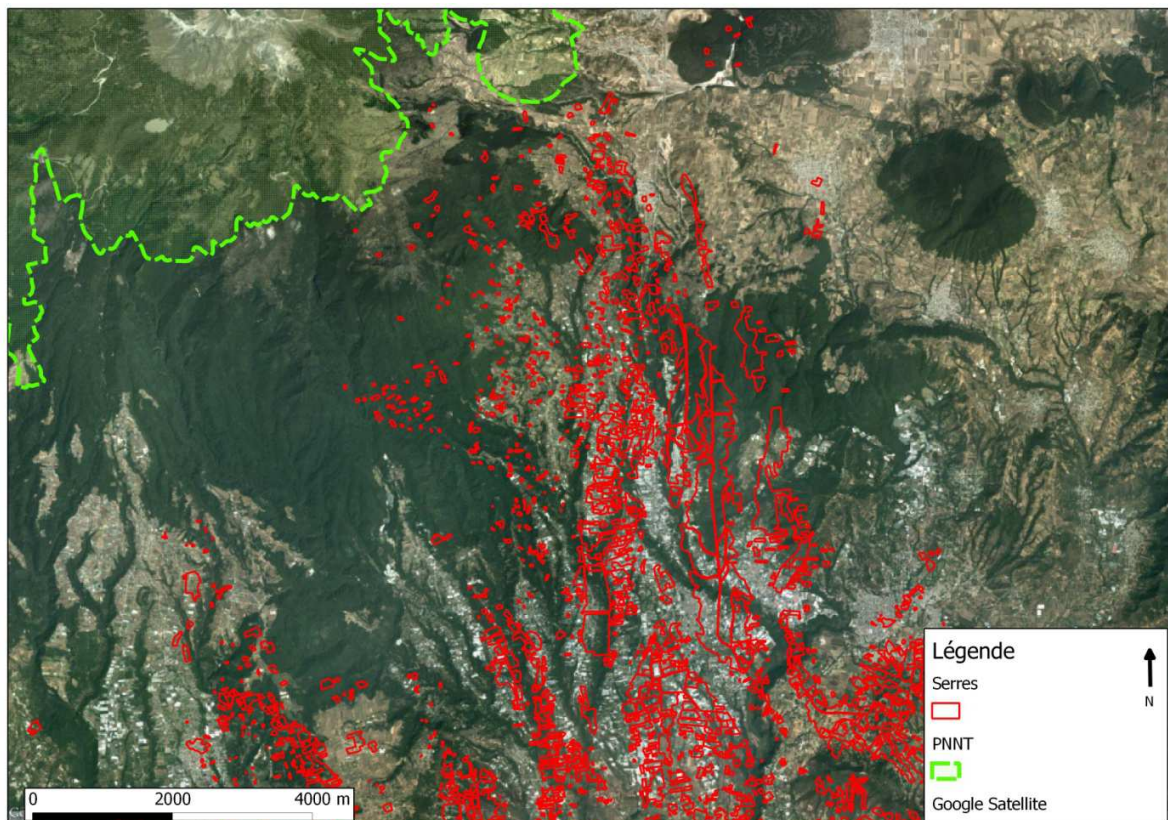
Le risque potentiel sur la sante humaine a été estimé à partir de données de population issues du recensement de 2010 (Service des Statistique du Mexique) et de la consommation de bromure de méthyle que nous avons estimée. L'objectif de cette analyse est d'identifier les zones où le risque sur la population de lié à la toxicité du bromure de méthyle est le plus grand.



## 3.7. Résultats et discussion

### 3.7.1. Surfaces cultivées sous serres

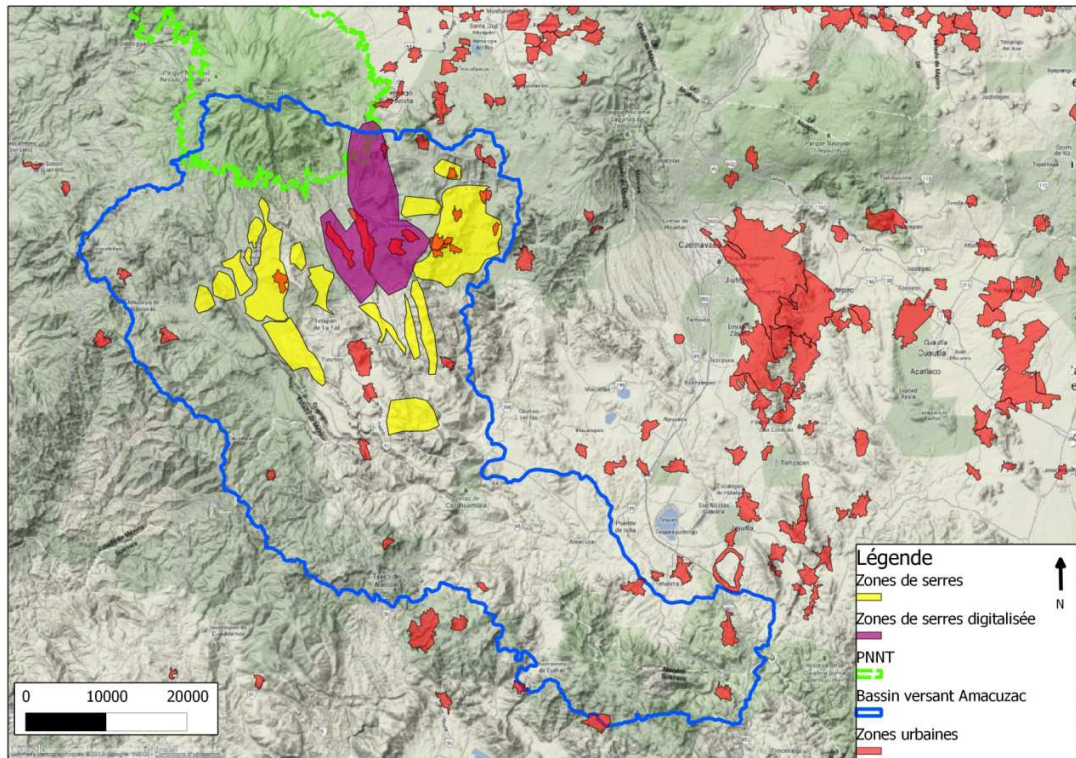
La photo-interprétation des images Google Maps et leur digitalisation a permis d'estimer la surface totale sous serres dans cette zone du bassin versant d'Amacuzac à 2.023,79 hectares (Figure 25).



**Figure 24: Cartographie des serres de la floriculture dans la partie amont du bassin versant d'Amacuzac.**

Source : Antonio Villanueva, 2013

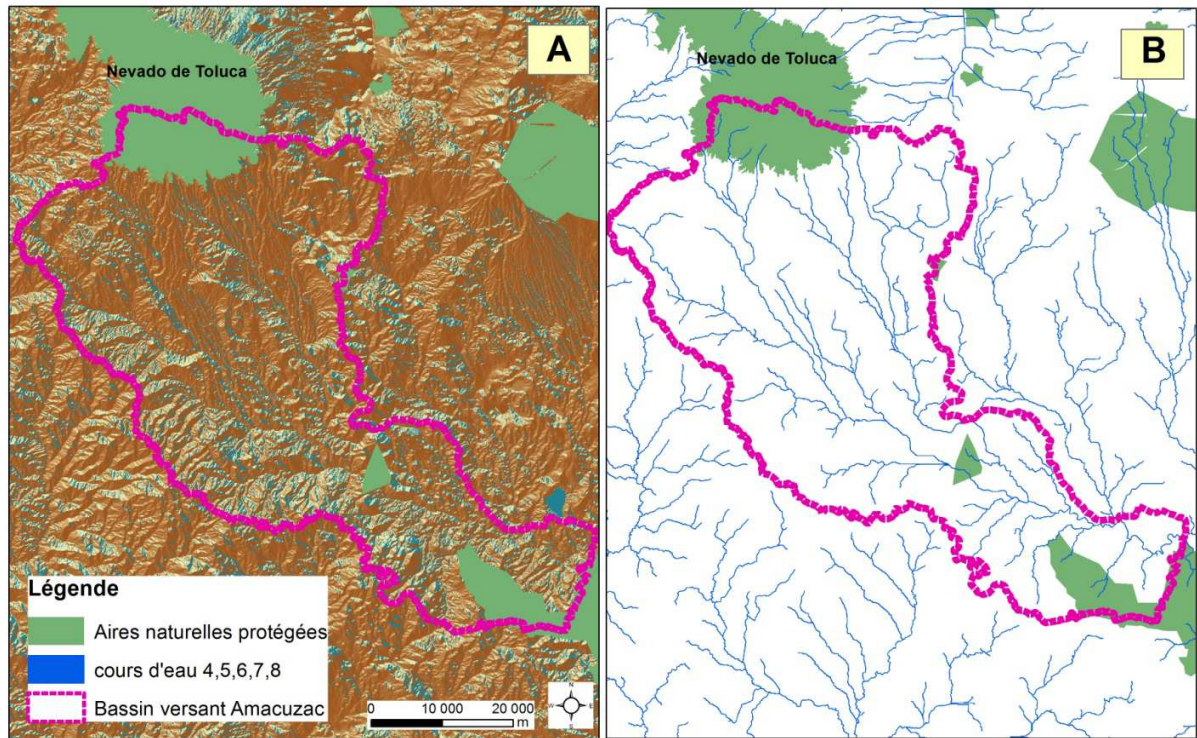
Toutes les serres présentes dans la zone, en particulier dans la partie basse du bassin versant, n'ont pu être digitalisées faute de temps. Mais la partie haute du bassin versant proche du Parc National Nevado de Toluca où se situe la majorité des serres a pu être cartographiée. Sur la Figure 26 on peut voir en couleur jaune les zones où se pratique la floriculture sous serres qui n'ont pu être cartographiées.



**Figure 25: Zones avec serres dans le bassin versant Amacuzac**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### 3.7.2. Délimitation de micro-bassins versant

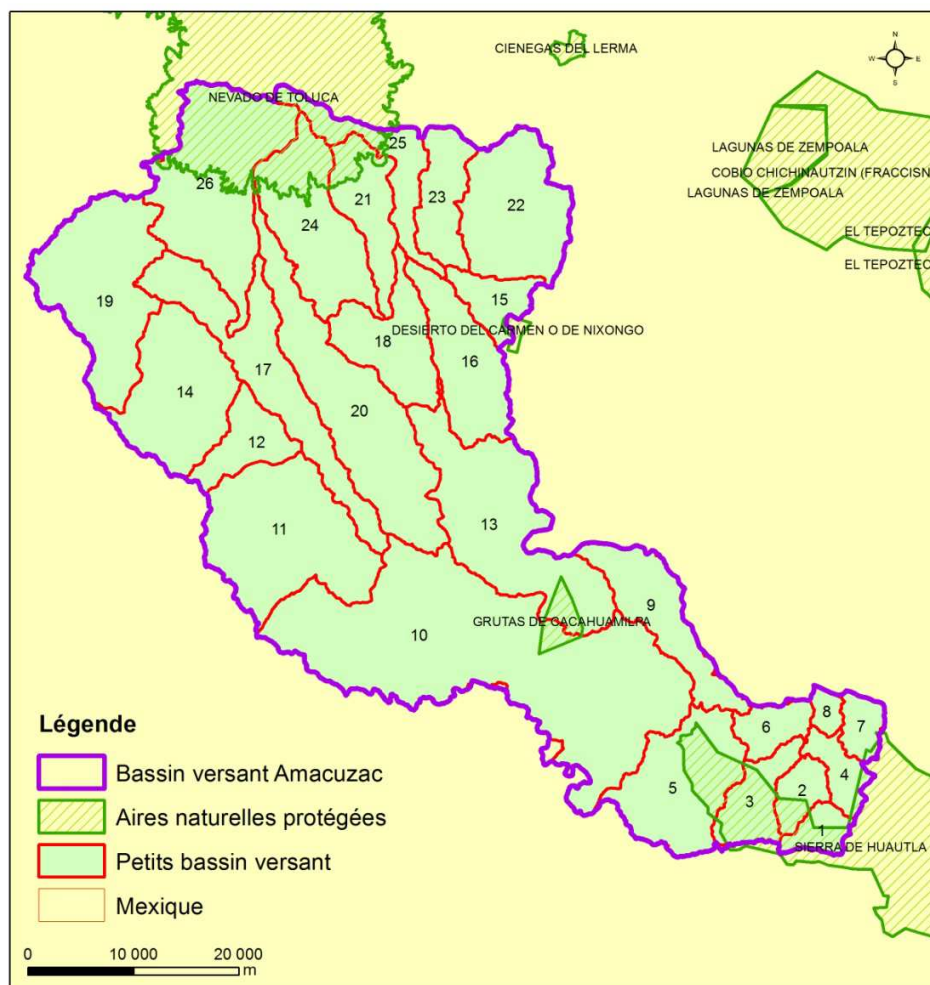
Sur la Figure 27 nous pouvons observer les deux couvertures utilisées pour délimiter les micro-bassins versants sur lesquels ensuite on a estimé les consommations d'eau et Bromure de Méthyle : à gauche (A) la couches des pentes calculées et à droite (B) la classification hiérarchique de Strahler des cours d'eau.



**Figure 26: Calculs utilisés pour l'estimation des micro-bassins versant : pentes du terrain et hiérarchie des cours d'eau**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

Cette analyse a permis d'identifier 26 micro-bassins versants.

Pour analyser ensuite les consommations d'eau et de bromure de méthyle on a associé les surfaces digitalisées de serres à chaque micro-bassin versant et à chaque commune (niveau administratif). Comme sur certains bassins ou communes nous n'avons pu réaliser le travail de cartographie des serres, les valeurs affectées dans ce cas sont S/I (sans information) (Figure 28).



**Figure 27: Délimitation des micro-bassins versants**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### 3.7.3. Distribution spatiale des serres

La majorité des serres est concentrée sur 7 micro-bassins versants de la rivière Amacuzac : bassins versant référencés 15, 16, 18, 21, 22, 23, 24 et 25 (Figure 29 A). Trois micro-bassins empiètent sur la Parc National Nevado de Toluca et ont des serres pour la floriculture : 24, 21 et 25. Sur la Figure 29 on observe que la pression sur l'environnement par ces serres s'exerce à la périphérie du PNNT, mais qu'à l'intérieur il n'existe aucune serre.

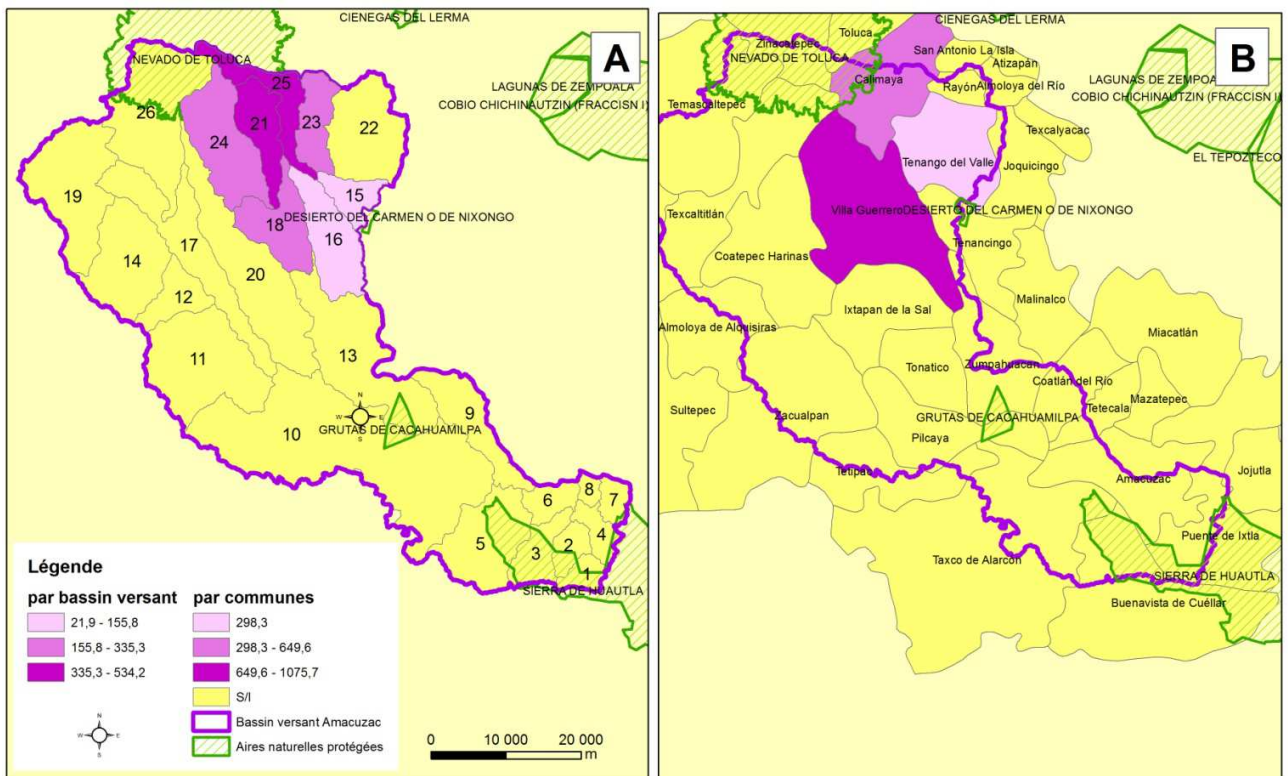
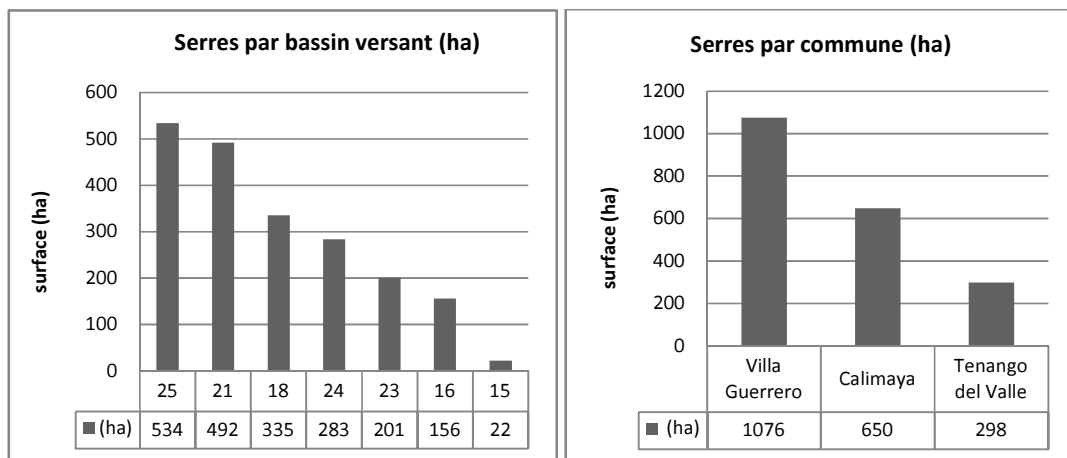


Figure 28: Surfaces (ha) couvertes en serres par micro-bassin versant et par commune  
Source : Antonio Villanueva, 2013

Sur la Figure 29 B on peut observer que la commune de Villa Guerrero a la plus grande concentration des serres. En fait, la surface en serres la plus importante se trouve dans les communes de Villa Guererro, Tenango del Valle et Calimaya. La seule commune de Villa Guerrero possède plus de 1.000 hectares de serres.

Sur la Figure 30 on peut observer que Tenango del Valle a la plus faible surface en serres. Toutefois cette analyse a des limites car tout le bassin versant de la rivière Amacuzac n'a pas été cartographié et des communes ou des bassins versants restent sans information.



**Figure 29: Distribution des surfaces (ha) de serres par micro- bassin versant et par commune**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

### 3.7.4. Résultats de l'estimation de la consommation d'eau par la floriculture dans le bassin versant Amacuzac

La consommation d'eau par la floriculture sur la zone d'étude a été estimée à 28.940 m<sup>3</sup>. Le micro-bassin versant où la consommation en eau pour l'irrigation des est la plus importante est le bassin n° 25, avec une consommation de 7 millions de m<sup>3</sup> par an (Figure 32). Ce bassin versant est en amont (proche du Nevado), dans une zone où la ressource en eau est abondante. Il est donc normal que ce micro-bassin présente les plus grandes valeurs de consommation en eau. Or nous sommes là proches du centre urbain de la commune de Villa Guerrero et cette forte consommation peut entrer en concurrence (conflit) avec la consommation d'eau par la population. L'analyse au niveau administratif de la consommation en eau par la floriculture montre que le territoire de la commune de Villa Guerrero a la plus forte consommation en eau pour irrigation des serres. (Figure 31), avec un total de 15.383 m<sup>3</sup> par an.

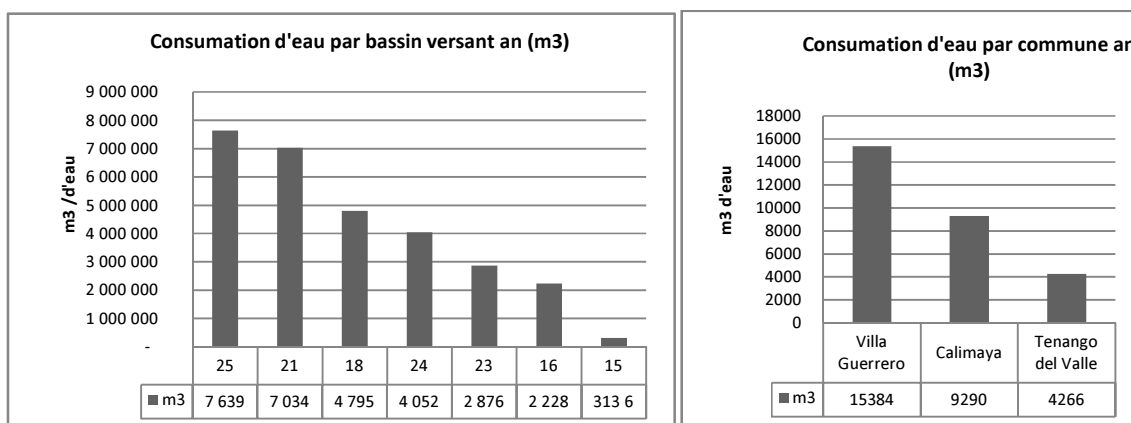
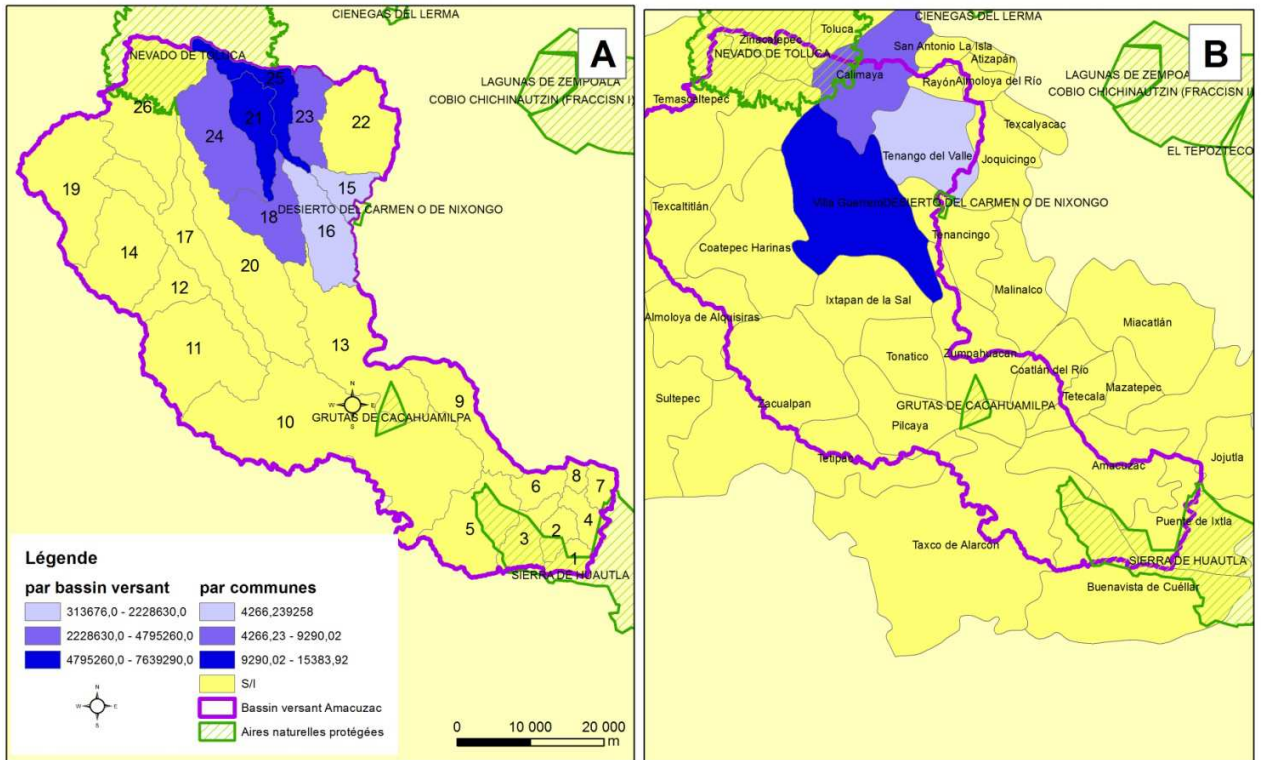


Figure 30: distribution de la consommation en eau (m<sup>3</sup>) par micro-bassin versant et par commune

Source : Antonio Villanueva, 2013



**Figure 31: Distribution spatiale de la consommation en eau (m<sup>3</sup>) par micro- bassin versant et par commune**

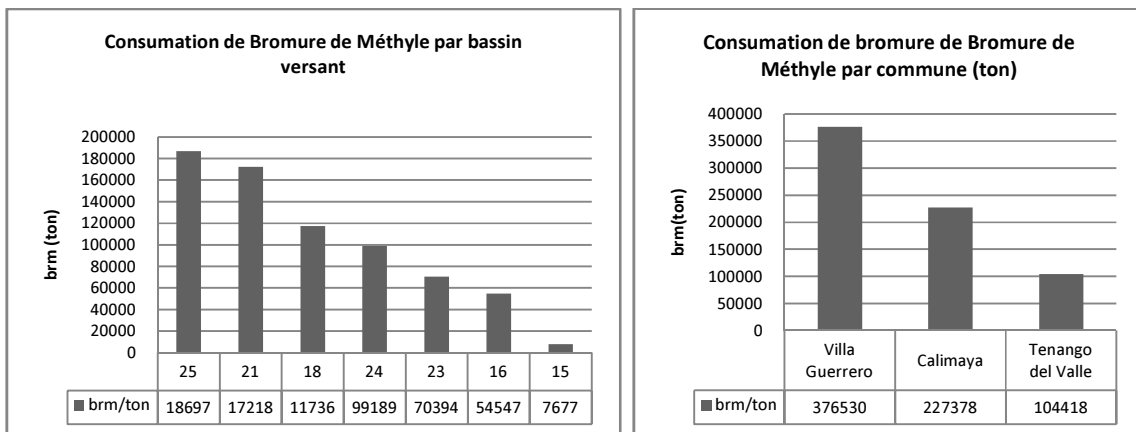
Source : Antonio Villanueva, 2013



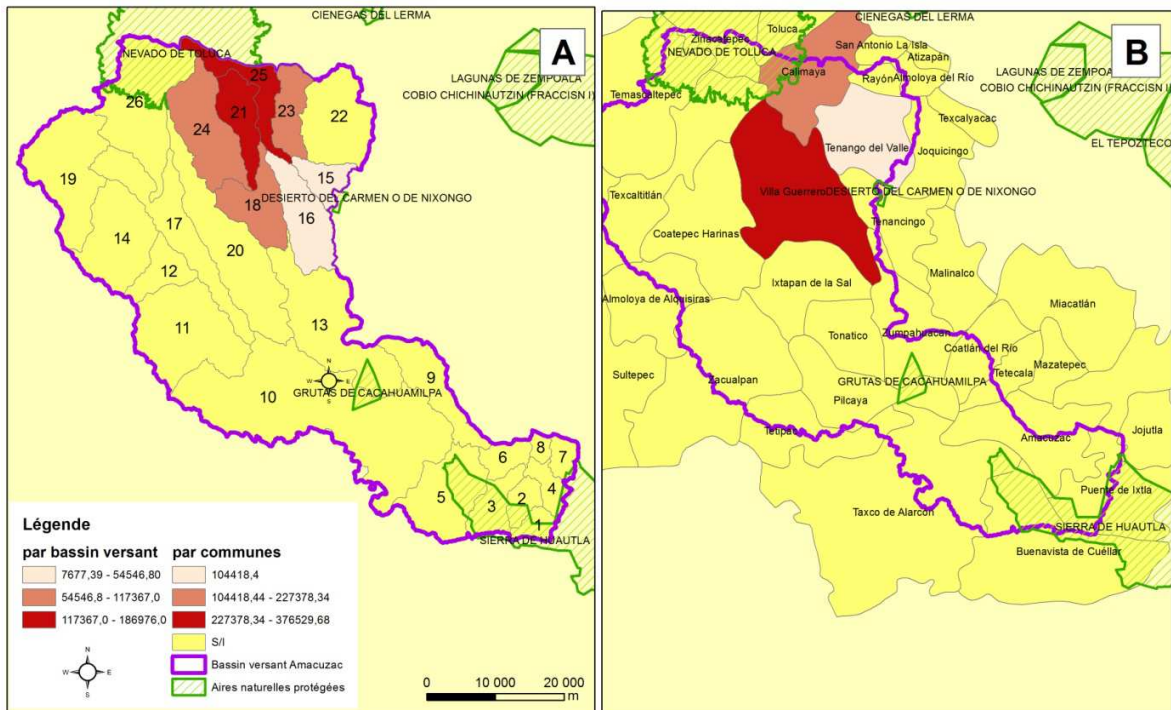
### 3.7.5. Consommation de Bromure de Méthyle

La consommation totale estimée pour la zone d'étude est de 708.330 kg/ha/an (Figure 18). La plus forte consommation se situe sur le bassin versant 25 (Figure 34). Les bassins versant avec de fortes consommations de bromure de méthyle (24, 21, 25).

L'estimation par commune montre que Villa Guerrero possède la consommation de Bromure de Méthyle avec la plus haute valeur 376.530 kg par an. (Figure 33). Si nous considérons cette zone comme un corridor naturel entre le PNNT et le Parc Sierras de Huautla, cette forte consommation de pesticides peut altérer l'état environnemental de ce corridor, avec des conséquences dans son équilibre écologique.



**Figure 32: consommation en bromure de méthyle (kg) par micro-bassin versant et par commune**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

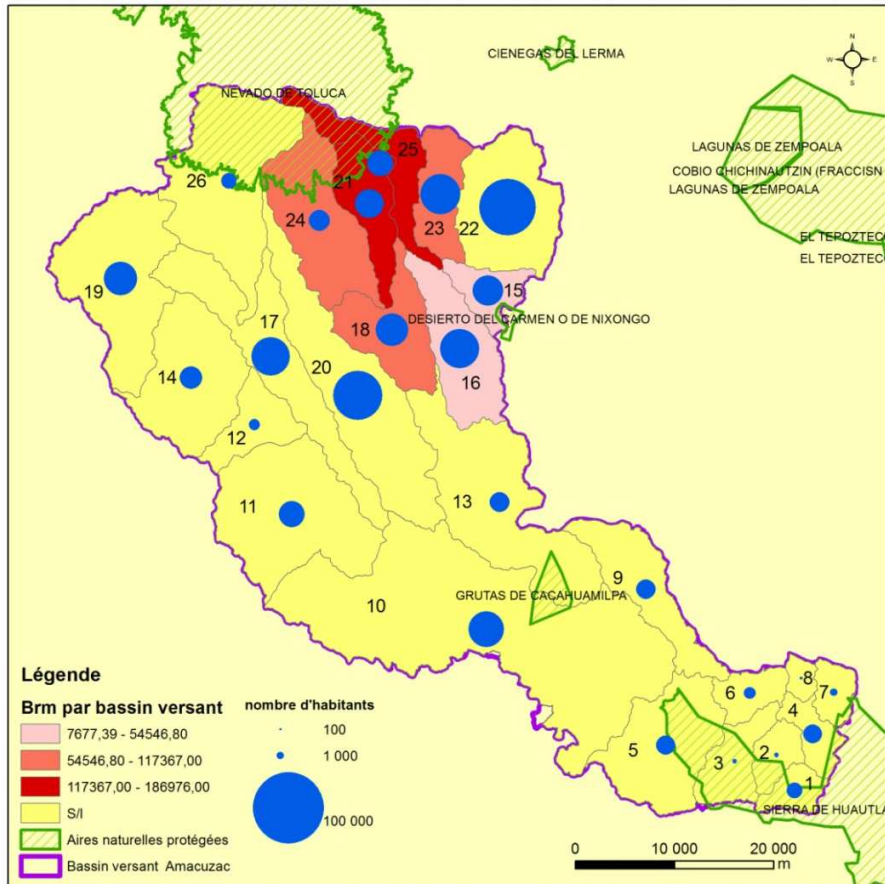


**Figure 33: Consommation en Bromure de Méthyle (kg) par micro-bassin versant et par commune**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

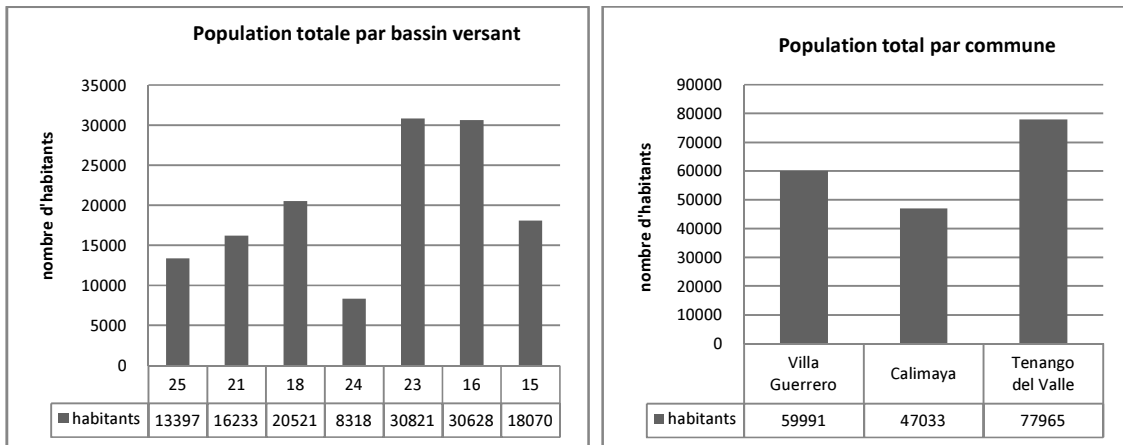
### 3.7.6. La population exposée à la pollution par le Bromure de Méthyle

La population totale selon le recensement de population mexicain pour l'année 2010 compte dans le bassin de la rivière Amacuzac 390.792 habitants. Le micro-bassin versant le plus peuplé est le bassin 22, avec une population totale de 61.568 habitants.

L'ensemble des micro-bassins ayant une forte consommation de Bromure de Méthyle (bassins 15, 16, 18, 21, 23, 24, 25) représente une population de 137.988 habitants. La population exposée à la pollution par le bromure de méthyle est donc importante (Figure 35). Bien entendu, j'en suis conscient, cette analyse demande à être détaillée avec d'autres données précises et validée par un travail de terrain.



**Figure 34: population exposée à la pollution au Bromure de Méthyle par micro- bassin versant**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013



**Figure 35: population exposée à la pollution au Bromure de Méthyle par micro- bassin versant**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

La commune avec une plus grande population est Tenango del Valle (Figure 36). C'est la commune la plus distante du Parc et de la zone des serres. Mais dans ses limites nous avons identifiée la présence de serres et ces serres n'ont pas été cartographiées dans cette étude. Il reste donc encore du travail pour aboutir à un diagnostic spatial sur les risques que courent les populations de cette zone avec la pollution au bromure de méthyle.

### **3.7.7. Discussion**

Ce chapitre a permis de retracer l'histoire courte de la floriculture sous serre pratiquée dans cette zone à l'ombre du Nevado et de la replacer dans son contexte économique, social et environnemental. Notre analyse nous a permis d'avoir une idée des consommations en eau de cette activité floricole, une eau provenant du Parc National Nevado de Toluca qui fait l'objet de paiements pour services hydriques (PSH). L'exposition de la population de la zone aux pollutions d'un pesticide, le bromure de méthyle, le plus utilisé et un des plus toxiques a été évaluée. Toutefois cette analyse possède un caractère exploratoire, et il sera nécessaire de poursuivre des recherches plus exhaustives et détaillées, en particulier sur les risques pour la santé humaine liés à l'utilisation massive de pesticide dans cette activité agricole hautement intensive qu'est la floriculture. Ce problème de santé devrait sans doute aussi requérir une attention particulière des gouvernements locaux et des autorités nationales.

Vu les caractéristiques locales, les analyses par micro-bassins versants nous semblent préférables à des analyses par communes, car dans cette unité spatiale que se distribuent les agents chimiques, à travers les cours d'eau superficiels, souterrains et par voie atmosphérique. L'activité horticole d'ornement sous en serres n'est pas la seule source de pollution dans la zone. L'activité horticole à ciel ouvert, en pleine terre, est aussi une activité importante et consomme beaucoup de pesticides. Ces parcelles de culture de fleurs n'ont pas été identifiées ni analysées dans cette étude du fait du temps disponible et des sources d'information disponibles. Il est souhaitable qu'à l'avenir, cette activité soit prise en compte. D'une manière générale, le principal obstacle à ce type d'analyse est le manque d'information disponible. C'est la raison pour laquelle la cartographie des serres a occupé une bonne partie du temps destiné à cette étude. .

## **4. Fragmentation des forêts. Réalité et contraintes d'un corridor forestier s'étendant du Parc du Nevado de Toluca jusqu'au Parc du Popocatepelt.**

Les pressions anthropiques sur le Parc National Nevado de Toluca présentées dans les chapitres précédents ont un rôle sur la fragmentation forestière du corridor écologique de l'axe volcanique central du Mexique. Celle-ci sera analysée dans ce chapitre avec l'objectif de mettre en évidence la réalité et les contraintes d'un corridor forestier qui irait du Parc du Nevado de Toluca à celui du Popocatepelt, corridor qu'envisagent actuellement les autorités publiques mexicaines pour la protection de la biodiversité nationale (la CONANP<sup>3</sup> et la SEMARNAT<sup>4</sup> en particulier). A une échelle régionale (1/500.000<sup>e</sup>), l'analyse cherchera à caractériser et hiérarchiser les aires forestières les plus fragmentées de cette région et leur connectivité.

### **4.1. Problématique de l'étude**

L'ensemble des Parcs Nationaux de la zone centrale du Mexique, composé par le PNNT, le Corridor Chichinautzi, et les Parcs Mariposas, Itzapopo et Sierra Huautla, est protégé depuis les années quatre-vingt de toute activité humaine menaçant la richesse endémique de ces espaces. Malheureusement, cette protection n'a pas été totalement efficace et il existe d'importants problèmes environnementaux à l'intérieur des Parcs et dans leur zones périphériques (Maass, Regil, et González 2006) Brenner 2006 ; Hernández et Granados 2006). La plupart des perturbations dans ces espaces naturels proviennent des activités humaines qui menacent la richesse des écosystèmes.

*Le 'valle central' a de plus la particularité d'être soumis à la forte pression humaine liée à la proximité de grandes métropoles (Mexico DF et Toluca) et cette pression s'exerce sur les écosystèmes forestiers par une perte d'habitats naturels.*

Or les études sur un corridor reliant ces espaces forestiers entre eux et sur l'impact des activités humaines sur les écosystèmes forestiers eux-mêmes sont rares et peu détaillées. Cette étude a pour but de caractériser et d'analyser la fragmentation et la connectivité de

---

<sup>3</sup> Commission National des aires Naturelles Protégées du Mexique.

<sup>4</sup> Secrétariat de l'Environnement et les Ressources Naturels.

ces écosystèmes et d'alimenter ainsi les débats sur la réalité et les contraintes d'un corridor forestier dans cette région.

## **4.2. Objectifs de recherche**

L'objectif est d'analyser la fragmentation (ici en tant qu'état et non processus) du couvert forestier dans le 'valle central' dont fait partie le Parc du Nevado à partir de la carte d'occupation des sols de 2005 disponible (CONABIO<sup>5</sup>, 2010). Cet objectif principal est décliné en trois objectifs spécifiques :

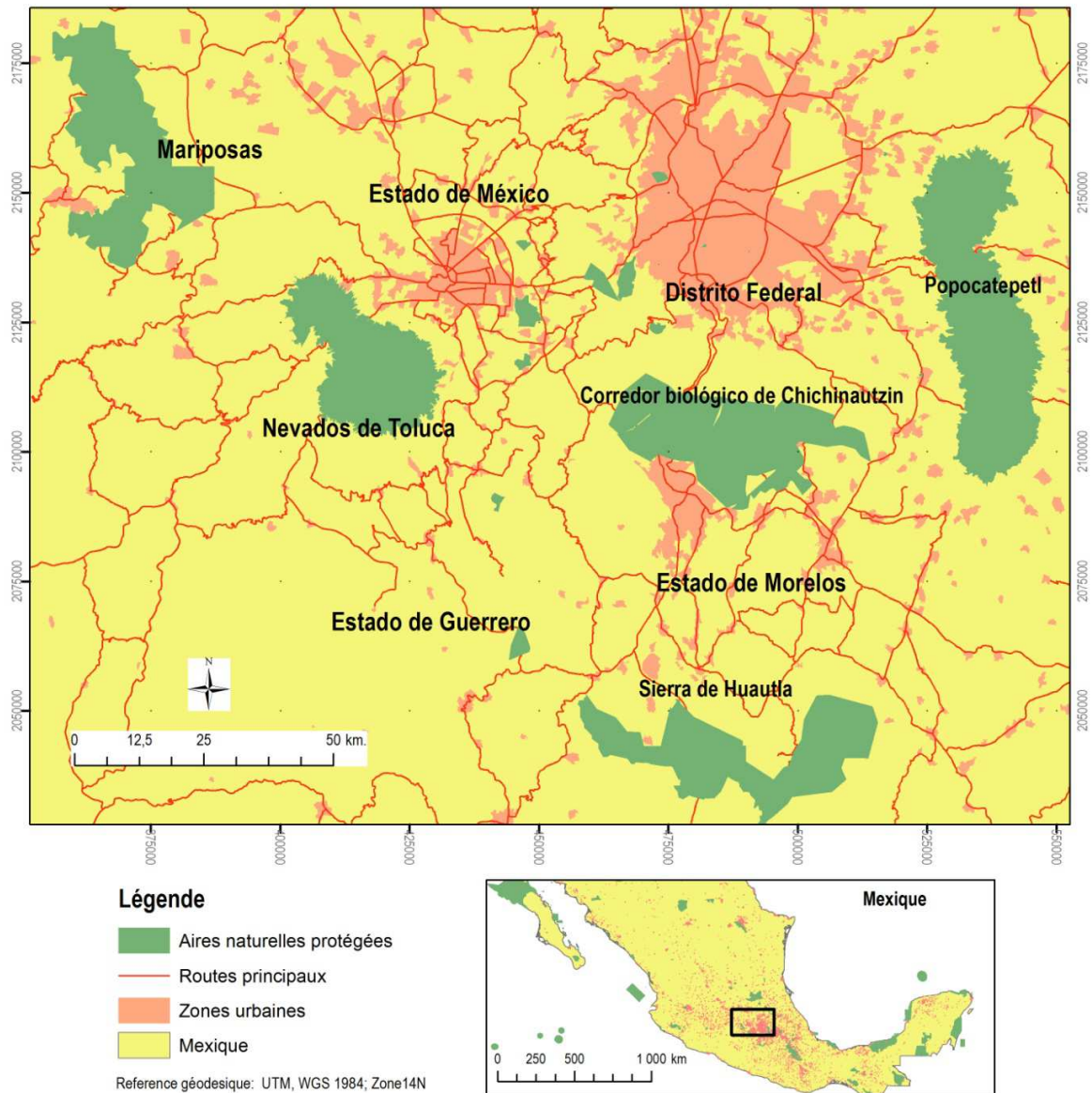
- Mettre en évidence la connectivité du couvert forestier et identifier les « connecteurs » les plus sensibles.
- Hiérarchiser les zones de fragmentation forestière.
- Mettre en relation les impacts anthropiques dans et à la périphérie du Parc Nevado de Toluca avec l'état de fragmentation du corridor volcanique central.

## **4.3. Zone d'étude**

La zone d'étude correspond à l'ensemble des Parcs de la région centrale du Mexique (PNNT, Corridor Chichinautzi, Parcs Mariposas, Itzapopo et Sierra de Huautla), et elle couvre une surface d'environ 330.000 ha. Ces parcs sont liés administrativement à 100 'municipios' (communes) situés dans les Etats de Mexico, Morelos, Guerrero et dans le 'Distrito Federal', la zone ayant la plus grande concentration de population du pays avec 29.192.937 habitants en 2010, soit 26% de la population total du pays (SERMARNAT 2010) (SERMARNAT 2012) (INEGI 2010) (Figure 37).

---

<sup>5</sup> Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad de México (Commission National pour la connaissance et le usage de la biodiversité du Mexique).



**Figure 36: Zone d'étude et Parcs de la zone centrale du Mexique**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013



## 4.4. Principes et concepts en écologie du paysage

La définition la plus acceptée d'un 'écosystème' est celle d'Arthur Tasley (1935) : «... *un système d'interactions entre les populations de différentes espèces vivant dans un même site, et entre ces populations et le milieu physique* ». Un écosystème est donc considéré comme un ensemble d'éléments en interaction les uns avec les autres, formant un tout cohérent et ordonné (Dajoz 1996)(Pickett et Cadenasso 2002). Selon cette définition, on peut considérer la forêt comme un écosystème formé de végétaux, d'animaux, d'insectes et de bactéries, et dominé par des arbres (Ramade 2005).

Pour analyser les écosystèmes forestiers, le concept d'écologie du paysage en intégrant la géographie et l'écologie permet de relier les structures spatiales, objets de la géographie, aux processus écologiques et écosystémiques (Dajoz 1996) (Burel et Baurdry 1999). De plus, « *l'écologie du paysage fournit les bases scientifiques pour l'aménagement du territoire et pour la réhabilitation des zones dégradées* » (Dajoz 1996).

Ce concept d'écologie du paysage est certes ancien puisqu'il a été développé en 1939 au sein de l'école allemande par le biogéographe Carl Troll, quelques années seulement après l'introduction du concept d'écosystème par Arthur Tasley en 1935. Mais ce concept a été réellement théorisé, instrumentalisé et implémenté dans les années 80 (Forman 1995a) (Dajoz 1996) (Burel et Baurdry 1999) (Makhdoum 2008), et il permet de nos jours de mobiliser des outils informatiques pour calculer des indicateurs de structure, d'organisation ou de dynamique des paysages.

### 4.4.1. Quelques définitions du paysage

Les définitions sont nombreuses. Nous n'en citerons ici que deux qui permettent de préciser notre objet de recherche.

« *Un paysage est une portion de territoire hétérogène composée d'écosystèmes en interaction qui se répètent de façon similaire dans l'espace* » (Forman et Godron 1981).

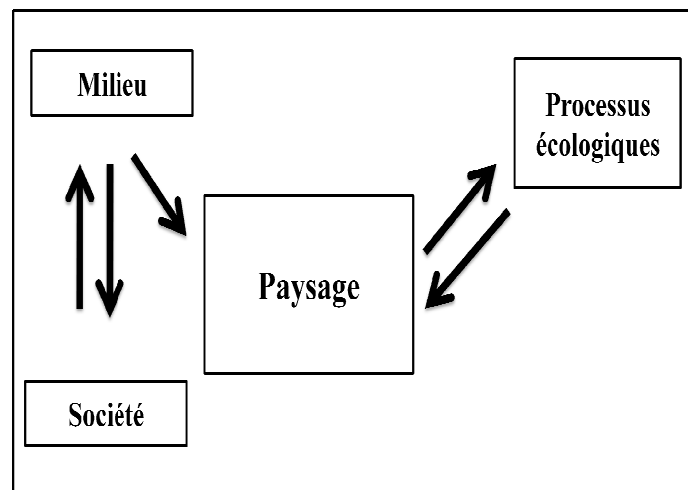
« *Un paysage est un ensemble de biogéocénoses (ou d'écosystèmes) relativement homogènes tels que des champs, des prés, des bois, des villages et des villes, etc., comprenant une matrice englobant, des taches et des corridors* » (Godron et Forman 1983).

De manière générale, nous pouvons considérer que le paysage se compose d'une structure complexe et systémique, laquelle peut être traitée à différentes échelles spatiales. En écologie du paysage, le paysage est une construction scientifique qui est appréhendée par d'autres moyens que l'observation visuelle directe : cartographie, télédétection spatiale. Dans ce paysage il est alors intéressant d'analyser l'organisation spatiale des entités qui le constituent et qui sont pertinentes pour le processus naturel étudié. De cette manière, la part

de subjectivité est réduite et il devient possible de ‘quantifier’ le paysage à l’aide des outils issus de l’écologie du paysage.

#### ***4.4.2. L’écologie du paysage : une démarche interdisciplinaire sur les relations homme-nature***

A partir d'une approche descriptive ou du fonctionnement des processus écologiques, les géographes, les historiens, les ethnologues, les sociologues, ont montré que la dynamique des paysages dépend en grande partie des relations entre les sociétés et leur environnement et crée des structures changeantes dans l’espace et dans le temps. Cette hétérogénéité spatio-temporelle qui en résulte est à l’origine de nombreux mouvements et flux d’organismes, de matière, d’énergie (Burel et Baurdry 1999) (Figure 38) au sein des paysages.



**Figure 37: Démarche scientifique en écologie du paysage**  
Source : d’après (Burel et Baurdry 1999)

#### ***4.4.3. Les éléments constitutants d’un paysage***

Un paysage est formé par trois éléments principaux : la matrice (en anglais Matrix), la tache (patch) et le corridor (Forman et Gordon 1986) (Dajoz 1996) (Burel et Baurdry 1999). La matrice est l’élément dominant, englobant. Le patch (nous préférons garder le mot anglais, plus utilisé et moins équivoque que le terme français) est un “élément du paysage” et sa délimitation dépend du système de classification utilisé et de l’échelle spatiale. Le corridor est un élément linéaire qui relie deux patches. L’ensemble des patches constitue une mosaïque et l’ensemble des corridors un réseau (Figure 39) (Burel et Baurdry 1999).

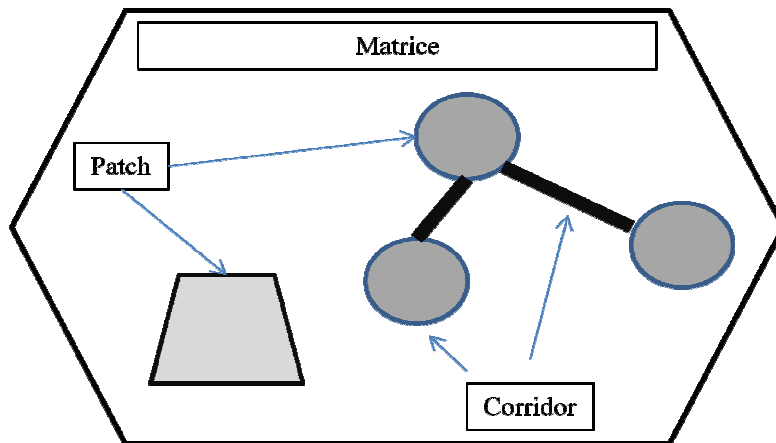


Figure 38: Les éléments constituant du paysage.  
(Source : (Burel et Baurdry 1999))

#### 4.4.4. La fragmentation des paysages et des écosystèmes

« Les perturbations peuvent être définies comme des événements séparés dans le temps qui modifient une population, un écosystème ou un paysage et en changeant la structure, le milieu physique et le fonctionnement. Le plus souvent les perturbations augmentent l'hétérogénéité des paysages en créant une mosaïque d'éléments» (Dajoz 1996).

Ces perturbations peuvent engendrer la fragmentation des paysages et avoir des impacts sur la conservation des espèces végétales et animales. En protégeant l'habitat, nous protégeons les espèces. (Ramade 2005). La fragmentation est donc un processus dynamique qui a un impact sur la structure du paysage : en augmentant la fragmentation, on augmente la perte d'habitat et on diminue la connectivité (Clergeau et Désiré 1999) (Forman et Gordon 1986) (voir Figure 40). A l'inverse, de grands patches de végétation naturelle ont un rôle écologique majeur et offrent de nombreux avantages dans un paysage, en particulier celui d'offrir un habitat (Forman 1995).

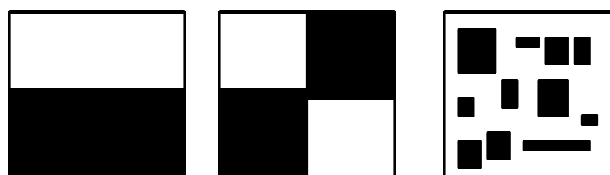
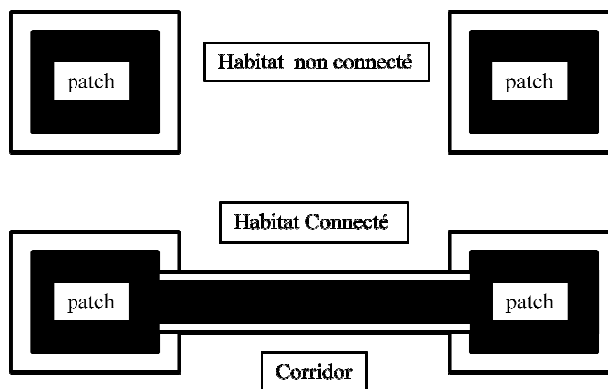


Figure 39: Différents niveaux de fragmentation du paysage  
Source : d'après (Burel et Baurdry 1999)

#### 4.4.5. La connectivité des écosystèmes et les corridors écologiques

Le concept de connectivité est lié au déplacement de populations, mais aussi à la biodiversité génétique des différents organismes présents, indispensables au maintien d'une espèce. Plus les tâches d'une classe sont éloignées les unes des autres, plus la connectivité de cette classe est faible (Bennett 1990) (Bennet, Henein et Merriam 1994).

Un réseau écologique assurant des connexions entre les habitats naturels des espèces par des 'corridors' est donc indispensable pour maintenir la connectivité des écosystèmes et la survie des espèces (Debray 2011) (voir Figure 41).



**Figure 40: La connexion d'habitats par un corridor**  
Source : d'après (Burel et Baurdry 1999)

« Un corridor écologique est un ensemble d'éléments du paysage qui permettent la circulation des espèces végétales et animales et relient les réserves de biodiversité » (Burel et Baurdry 1999) (Clergeau et Désiré 1999). Ce concept de corridor (corridor biologique ou écologique) est le concept qui a été le plus fréquemment utilisé dans les pays de Nord et du Sud pour la conservation de la biodiversité (Burel et Baurdry 1999) (Blanc-Pamard et Ramiarantsoa 2008) (Vila Subirós et al. 2006).

Quatre types de corridors sont le plus souvent considérés :

1. Corridors linéaires. Ils correspondent à des chemins, des routes, des haies, des limites de fossés et des canaux d'irrigation. Ils sont étroits et souvent avec seulement des espèces caractéristiques des bords de tâches.
2. Corridors de bandes. Ce sont des bandes plus larges dans lesquelles les espèces peuvent migrer et vivre.
3. Corridors de cours d'eau. La dimension varie en fonction des dynamiques de régulation hydrique.
4. Corridors en réseaux. Il s'agit de connexions entre différents corridors.

C'est ce dernier type que nous essaierons de mettre en évidence dans notre étude.

#### ***4.4.6. Les indicateur utilisés en écologie du paysage***

Pour mesurer la fragmentation et la connectivité des paysages, cinq grands groupes d'indicateurs peuvent être mesurés (Burel et Baurdry 1999) (McGarigal et Cushman 2002) (Botequila, Miller et McGarigal 2006) (Vila Subirós et al. 2006).

1. Indicateur de surface. Ils correspondent à la taille et au nombre de tâches d'une matrice. Ce sont des indicateurs globaux qui traduisent la morphologie du paysage.
2. Indicateur de forme. Ils représentent la forme des tâches et sont utilisés pour les analyses morphologiques et fonctionnelles du paysage.
3. Indicateurs des écôttons et habitat intérieur. Ils permettent de faire des calculs comparatifs entre la surface intérieure d'un patch et la surface du bord de ce même patch. Ils représentent la taille de l'habitat intérieur le plus protégé des perturbations anthropiques.
4. Indicateur de diversité. Ils sont utilisés pour comparer différents types de paysages ou pour suivre les modifications du paysage dans le temps. Ils traduisent la composition et l'hétérogénéité du paysage.
5. Indicateur de distance et de connectivité. Ils estiment les distances entre le patch et permettent de mesurer l'isolement ou la connectivité entre les différents patches.

#### ***4.4.7. Les outils pour mesurer ces indicateur***

Il existe une grande variété de logiciels pour quantifier les structures et les processus dans les paysages (Haines-Young, Green et Cousins 1993) (Burel et Baurdry 1999)(Vila Subirós et al. 2006). On peut citer ici :

*Fragstats.* C'est le plus connu et le plus utilisé. Il a été créé en 1995 par Kevin McGarigal et Barbara Marks à l'Université d'Oregon. Fragstats fonctionne avec des données de type raster. C'est le plus complet des outils de calcul en écologie du paysage. Sa principale limitation, à mon sens, est qu'il n'a pas d'interface cartographique et se limite à produire des statistiques. Il est téléchargeable sur le site <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

*Grass.* La première version de ce logiciel est apparue en 1980 aux Etats Unis. Il s'utilise avec des données en format raster. Avec Grass, il est possible d'utiliser le logiciel Qgis (SIG) et de visualiser les résultats directement sur GoogleMaps. Ce logiciel est gratuit et peut être téléchargé sur le site <http://grass.osgeo.org/download/software/ms-windows/>

*V-late.* Ce logiciel a été créé en 2003 par l'équipe de travail 'Landscape and Resource' de l'Université de Salzburg en Autriche. Ce logiciel travaille en format vectoriel et se présente comme une extension du logiciel ArcGis. C'est une application libre, disponible sur le site <http://resources.arcgis.com/es/home/>

*Patch analyst.* Ce logiciel a été créé en 1999 par Phil Elkie, Rob Rempel et Angus Carr au Canada. Il permet de calculer des indicateurs de paysage et de faire les analyses de structure de paysage directement sur ArcGis avec des sorties cartographiques. Il permet d'utiliser à la fois le format vecteur et le format raster. Il est libre d'accès sur le site <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>. À mon sens il est peu adapté lorsqu'il s'agit de travailler avec de grandes quantités de données raster.

## 4.5. Données et méthodes utilisées dans notre analyse

L'analyse quantitative de la fragmentation a été réalisée à partir d'une carte d'occupation des terres, réalisée par la Commission Nationale pour la Biodiversité de Mexique (CONABIO). La nomenclature initiale de cette carte comporte 14 types différents d'occupation des terres (voir Figure 42).

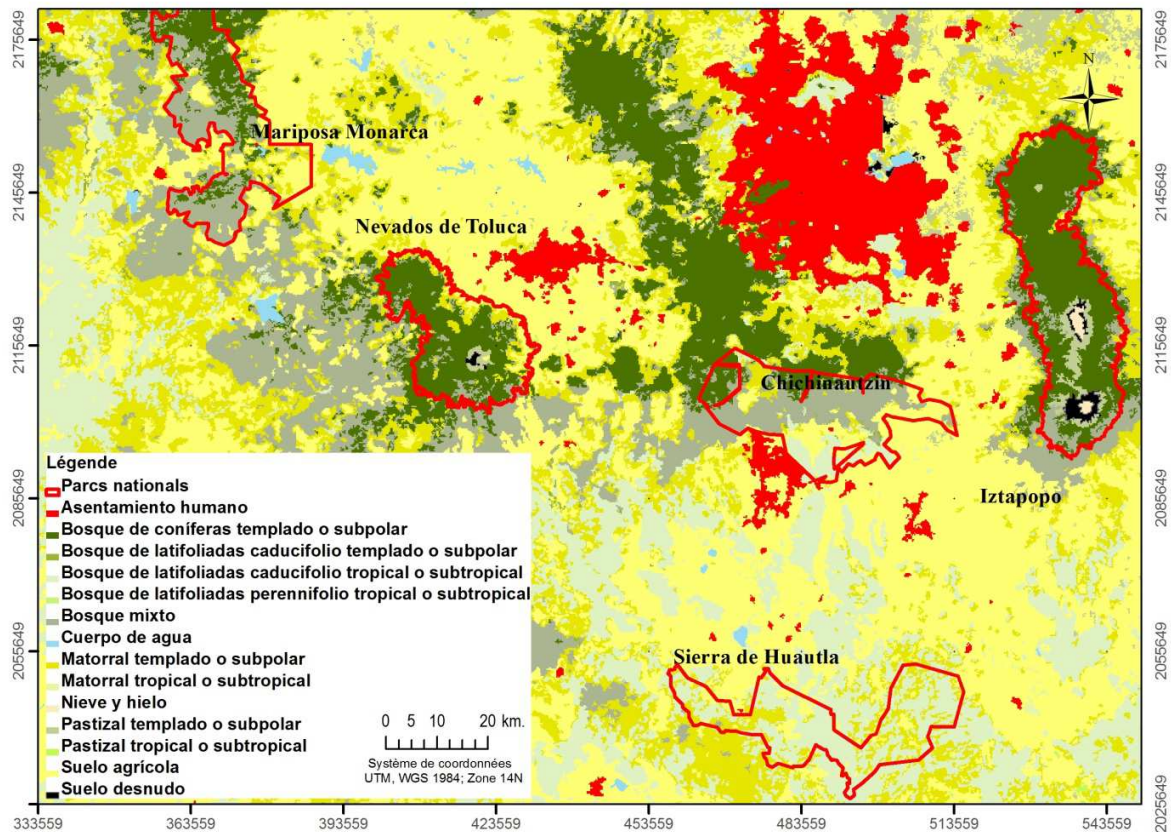


Figure 41: Carte d'occupation des terres utilisée dans notre analyse (CONABIO), 2005

Source : <http://www.conabio.gob.mx>

L'échelle de cette carte est le 1/500.000<sup>e</sup>. Cette échelle est malheureusement relativement grossière pour faire des analyses locales et précises, et l'absence de données plus détaillées est à regretter. Les résultats obtenus doivent de fait être considérés comme une première analyse exploratoire.

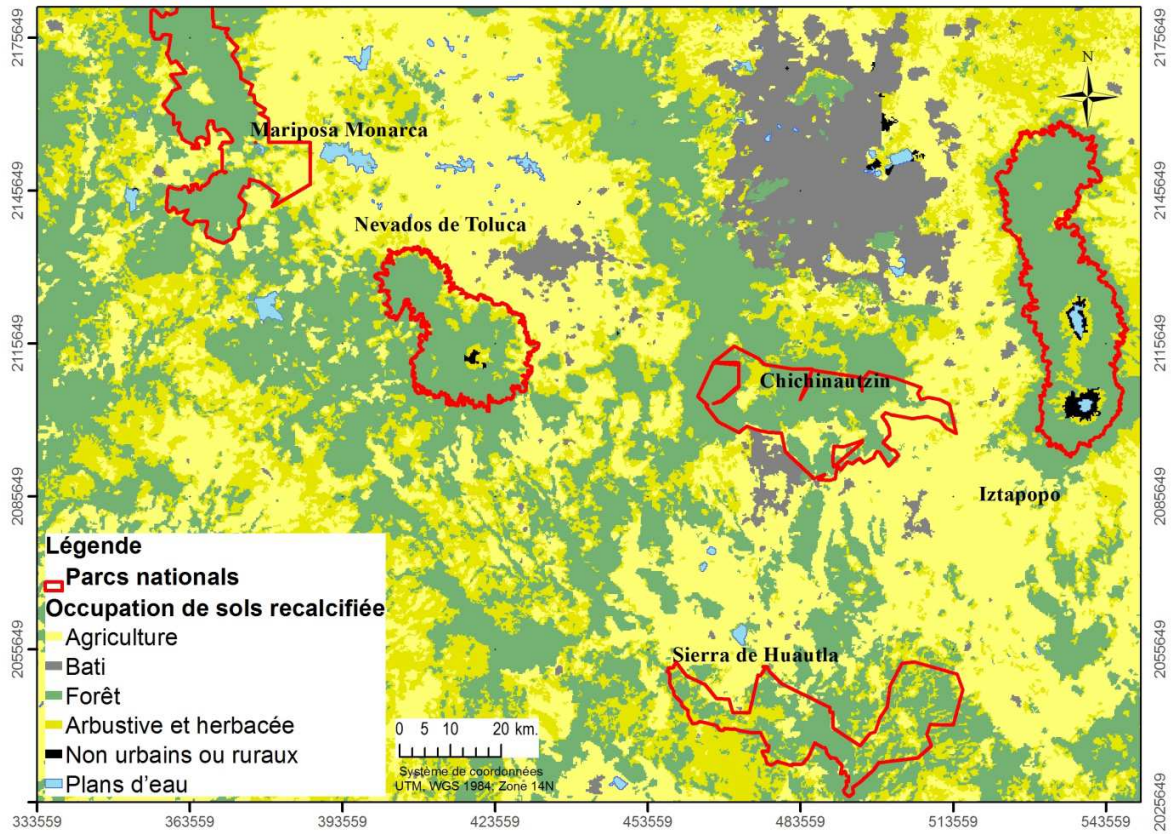
#### 4.5.1. Les données d'occupation des terres

Pour mieux répondre à notre besoin d'analyse de la fragmentation et de la connectivité, la carte d'occupation des terres a été simplifiée et les types d'occupation des sols ont été regroupés en 6 grandes classes : bâti, forêt, végétation arbustive, espaces nus urbains ou ruraux, agriculture et plans d'eau (Tableau 7 suivant et Figure 43).

Classe	Description
<b>1 Bâti</b>	Établissements humains ; espaces dominés par des bâtiments et résidences, zones industrielles et commerciales
<b>2. Forêt</b>	Formations végétales principalement constituées par des arbres (conifère, tempérée ou subpolaire, latifoliées feuilles caduques tempérée ou subpolaire, latifoliées feuilles caduques tropical ou subtropical et forêt mixte).
<b>3. Végétation arbustive et herbacée</b>	Correspond aux arbustes ; des plantes à fleurs, des fougères ainsi que des petits végétaux ligneux sous-arbustifs (Matorral tempérée ou subpolaire, Matorral tropical ou subtropical)
<b>4. Espaces nus urbains ou ruraux</b>	Espaces ouverts non-bâti et sans végétation
<b>5. plans d'eau</b>	Étendues d'eau, naturelles ou artificielles et glaciers
<b>6. Agriculture</b>	Espaces présentant des cultures.

**Tableau 6. Classes d'occupation des terres après regroupement**  
Source : Antonio Villanueva, 2013





**Figure 42: Carte d'occupation de terre après regroupement**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

#### 4.5.2. Le modèle de percolation

Pour analyser et mettre en évidence les corridors biologiques forestiers ‘potentiels’, nous avons utilisé le modèle de ‘percolation’. Ce modèle mathématique, dérivé de la dynamique des fluides en milieux poreux, a été développé de façon générique par Broadbent et Hammersley (1957)<sup>6</sup>. Appliqué aux paysages et à ses composantes, ce modèle considère la probabilité qu’un être vivant réalise ses déplacements fonctionnels en relation avec la proportion de l’espace d’habitat dans le paysage. Si cette proportion s’approche du seuil de 0,59 alors il existe une percolation et les organismes sont capables de se déplacer, sinon il n’y a pas de déplacement (Bunn, Urban, and Keitt 2000) (Décamps et Décamps 2007) (Pérez-Rea et al. 2009) (Amor and Bui 2009) (Amor, Lavallée et Bui 2013). En dessous de ce seuil, un individu reste confiné dans le patch où il se situe ; sitôt dépassé le seuil, l’individu « percole » et se retrouve loin de son point de départ (Burel et Baurdry 1999) (Kimberly et With 1995).

Burel et Baurdry (1999) illustrent la théorie de la percolation à l’aide de l’exemple graphique de deux grilles, l’une grise en A et l’autre foncée en B (Figure 44). La situation A est favorable à la percolation alors que la situation B est défavorable. Chaque grille est formée de pixels élémentaires, disposés de façon aléatoire. Lorsqu’on augmente progressivement le nombre de pixels foncés, le nombre et la taille des patches foncés voisins augmente. Cette percolation augmente fortement quand on s’approche de la valeur critique de percolation qui permet alors à un individu de traverser l’espace (la grille).

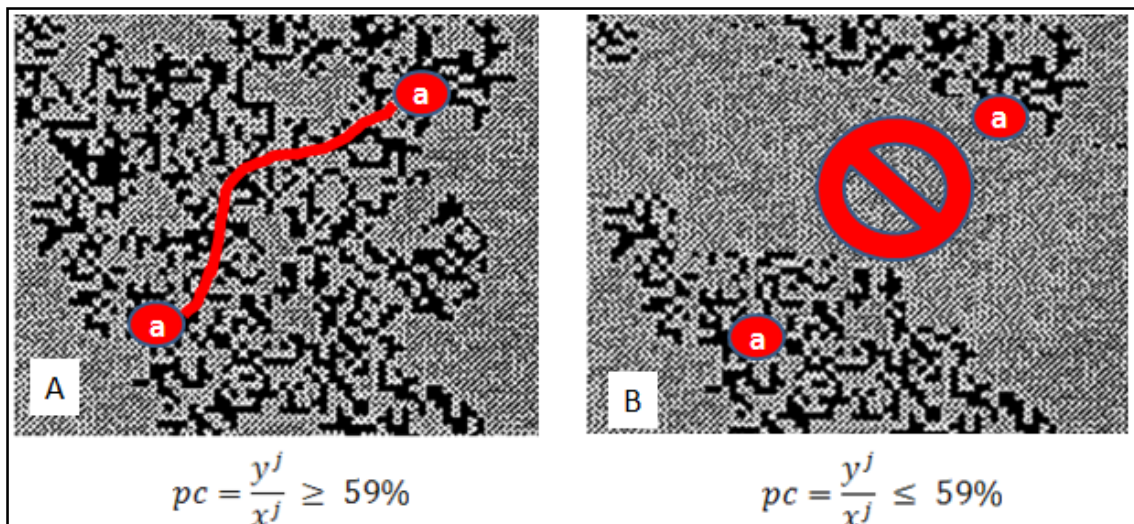
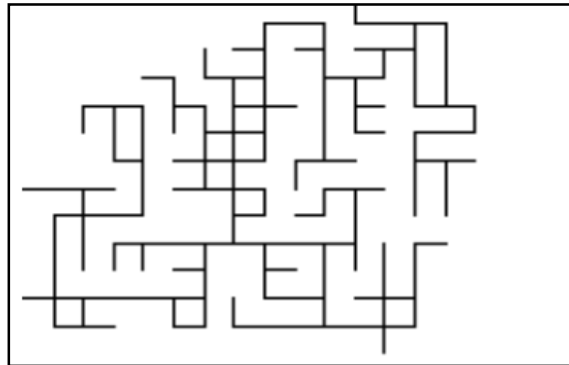


Figure 43: Etats de percolation  
Source : Après (Burel et Baurdry 1999)

<sup>6</sup> Broadbent S. and Hammersley J.M. Proc. Cambridge Philos. Soc. 53, 629 (1957)

Ce modèle de percolation permet de plus de définir les composants qui n'ont aucune connectivité dans le réseau, comme les « bras morts » du réseau qui n'aboutissent nulle part (Last et Thouless 1971). Dans la Figure 45, nous pouvons voir des bras morts qui correspondent à des chemins avec un départ connecté au réseau, alors que l'arrivée n'est pas connectée au réseau.



**Figure 44: Exemple des bras morts dans la théorie de la percolation**  
Source : Antonio Villanueva, 2013, d'après (Last et Thouless 1971)

La formule du seuil critique de percolation pour mesurer la connectivité forestière a été appliquée à l'échelle de l'ensemble des parcs naturels de l'Etat du Mexico (Mariposas, Nevados de Toluca, Itzapopo et Sierra de Huautla)

(1) ;

$$pc = \frac{y^j}{x^j} \geq \mu$$

Où ;

$pc$  = Seuil de percolation

$y^j$  : Surface de l'habitat forestier par chaque cellule  $j$

$x^j$  : Surface de chaque cellule  $j$  (2km\*2km)

$\mu$  : Constante de la limite critique de percolation 0,592746

### 4.5.3. Choix des indicateur pour la fragmentation et la connectivité

Les indicateur sélectionnés pour ce travail on été déjà utilisés dans d'autres études du couvert forestier (Haines-Young, Green et Cousins 1993) (Burel et Baurdry 1999) (McGarigal et Cushman 2002). Ils ont été regroupés selon les deux objets d'analyses que nous nous sommes fixés :

- L'extension de l'écosystème forestier
- La fragmentation de l'écosystème forestier

Pour les quantifier, nous avons utilisé le logiciel le plus complet dans ce domaine : Fragstats 4.0. L'intérêt de ce logiciel réside dans la possibilité de calculer un très grand nombre d'indicateurs et dans son acceptation par une grande partie des chercheurs travaillant en écologie du paysage (McGarigal et Cushman 2002)(Vila Subirós et al. 2006). Les indicateurs spatiaux calculés par Fragstats que nous avons retenus sont (Tableau 8):

Utilisation	Indice	Description	Etendue	Echelle d'analyse
<b>Extension d'habitat</b>	PLAND	Pourcentage de la surface de la classe dans le paysage.	$0 \leq \text{PLAND} \leq 100$	classe
	LPI	Pourcentage de la part du patch le plus vaste de chaque classe dans le paysage.	$0 \leq \text{LPI} \leq 100$	classe
<b>Fragmentation d'habitat</b>	PD	Nombre de patch par 100 hectares	$\text{PD} \geq 0$	classe

**Tableau 7. Les indicateurs spatiaux retenus pour notre analyse du paysage**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

Le choix de ces indicateurs est justifié par leur large utilisation dans des travaux similaires sur la fragmentation forestière ou sur les dynamiques urbaines. Par exemple, la fragmentation forestière en Amérique Centrale avec l'étude de la forêt salvadorienne (Imbernon, et al. 2005) ou le cas européen avec l'étude urbaine dans la vallée de la Bruche dans le Bas-Rhin (Skupinski, BinhTran et Weber 2009) ou encore le cas de la diversité aviaire côtière de l'Oregon aux États-Unis d'Amérique (Cushman et McGarigal 2003).

Les trois indicateurs sélectionnés correspondent de plus, aux trois objets d'analyse que nous envisageons et ils sont simples à interpréter. Nous aurions pu retenir des indicateurs supplémentaires, mais il nous paraissait important à ce stade d'éviter d'alourdir l'analyse.

PLAND : Pourcentage du paysage (Percent of Landscape, PLAND)

Cet Indice quantifie l'abondance de chaque type de patch dans le paysage et mesure la composition du paysage. Il approche 0 quand la classe est très peu présente dans le paysage et il est égal à 100 lorsque l'ensemble du paysage est constitué de cette classe.

(2) ;

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{r=1}^n a_r}{A} (100)$$

Où:

*n*: nombre total de patches de la classe *i*

*P<sub>i</sub>* proportion de paysage occupée par les patches de type *i*

*a<sub>r</sub>* : surface du patch *r* de type *i*

*A* : surface totale du paysage

LPI : Indice de plus grand patch (Largest Patch Index)

Cet indice permet de quantifier la dominance d'un patch dans une classe du paysage par rapport aux autres. Il mesure la part du patch le plus vaste de chaque classe dans le paysage.

(3) ;

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^n (a_{jir})}{A} (100)$$

Où :

*n* : nombre total de patches de la classe

*a<sub>j</sub>* : surface du patch *j*

*A* : surface totale du paysage

*PD: Densité des patches (Patch Density, PD)*

La mesure de la densité des patches est égale au nombre de patches de chaque classe dans le paysage divisé par la superficie totale du paysage. Cet indice permet d'évaluer l'état de la fragmentation du paysage.

(4) ;

$$PD = \frac{n_i}{A}$$

Où :

n : nombre total de patches de la classe

A : superficie totale du paysage

## 4.6. Résultats et discussion

### 4.6.1. Connectivité de la couverture forestière

Pour délimiter les corridors 'potentiels' qui permettraient de relier les écosystèmes forestiers et arbustifs dans la région d'étude qui couvre 62.000 km<sup>2</sup>, nous avons construit des cellules de 4 km<sup>2</sup> chacune. Sur chacune des cellules a été calculé le seuil de percolation des écosystèmes forestiers qui nous a permis d'estimer leur connectivité. La Figure 46 montre les résultats obtenus. En couleur verte, nous pouvons observer les cellules où il existe une percolation ou une connectivité, c'est-à-dire, où théoriquement un organisme ou un animal se peut déplacer fonctionnels dans l'écosystème. Les cellules en grisé sont celles où il n'existe pas de connectivité de la couverture forestière.

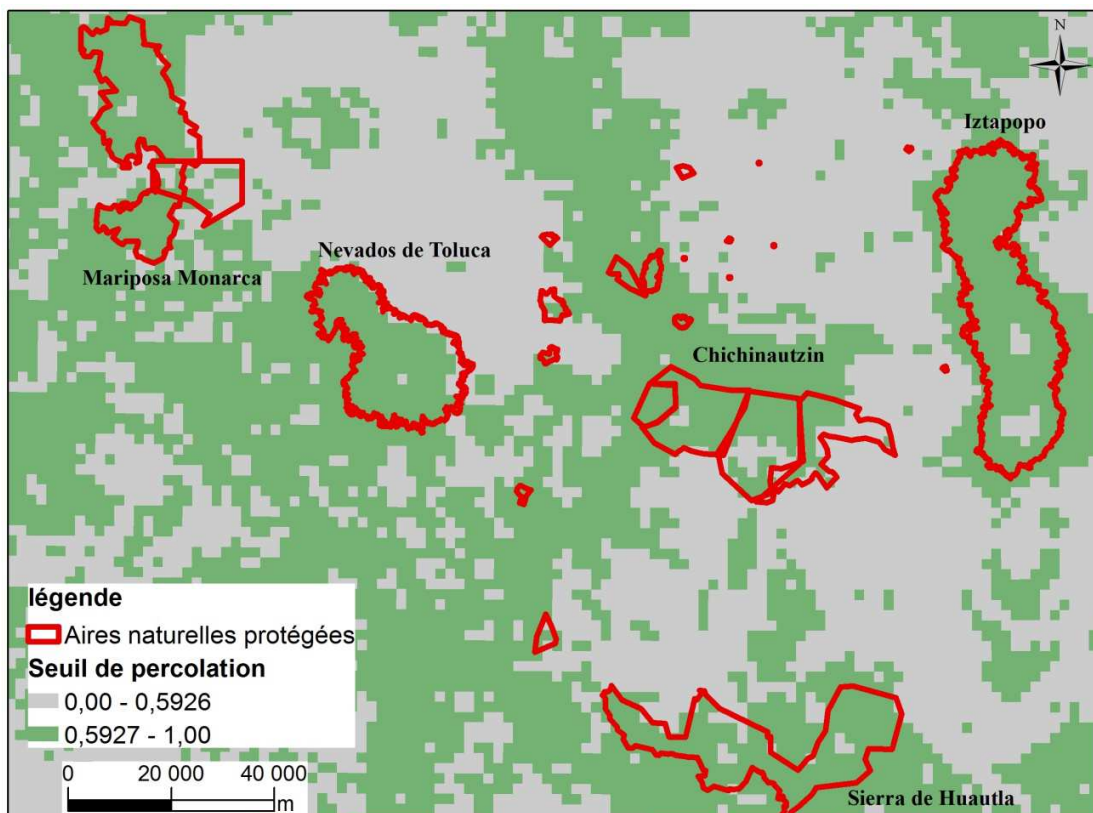
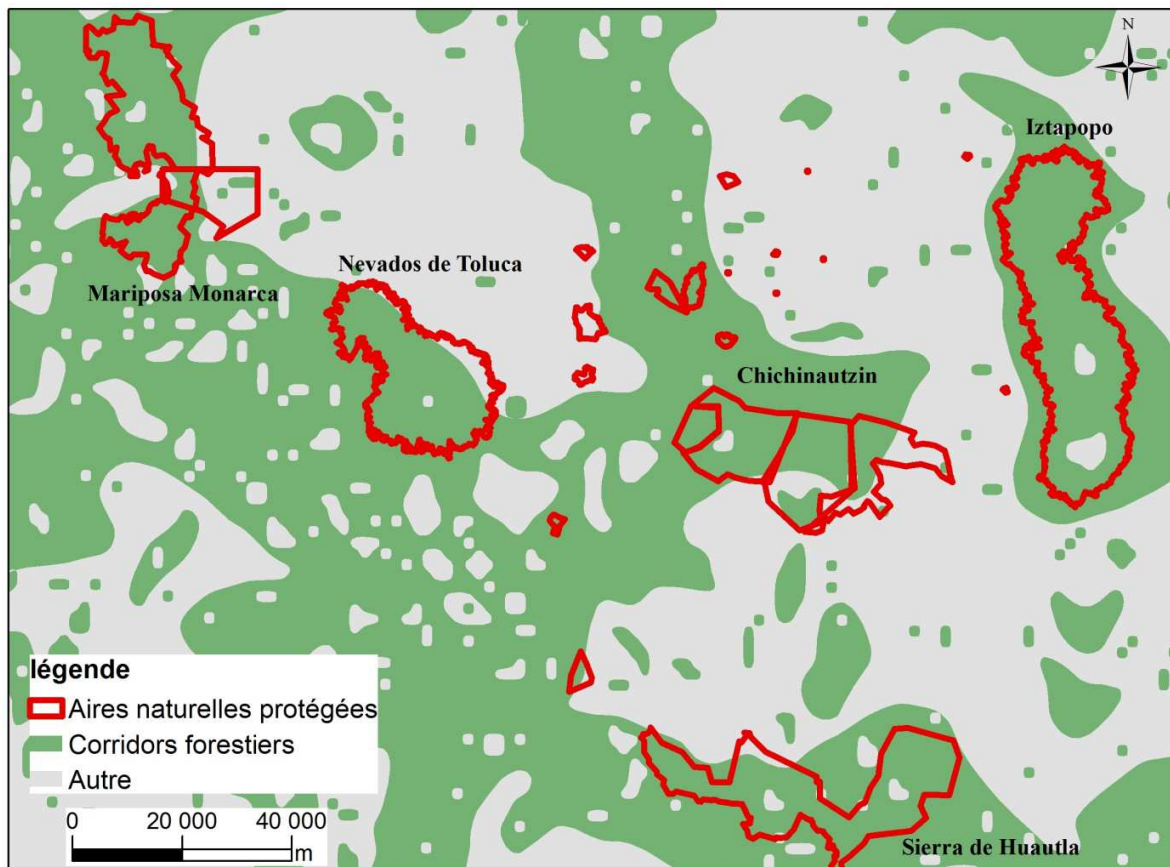


Figure 45: La connectivité des écosystèmes forestiers dans la région centrale volcanique du Mexique  
Source : Antonio Villanueva, 2013, après du CONABIO, 2013

Cette cartographie des corridors potentiels a ensuite été vectorisée pour obtenir une représentation plus proche de l'utilisation réelle des sols. Lesquelles correspond souvent à des éléments naturels du paysage : courbes niveau ou cours d'eau (Figure 47).



**Figure 46: Les corridors forestiers 'potentiels' après ' Source : Antonio Villanueva, 2013**

L'analyse de la connectivité du couvert forestier en relation avec la géomorphologie de cette région (Figure 48) nous montre que les zones avec la plus grande perturbation de la connectivité forestière se situent aux altitudes les plus basses, sous les 2.000 m. A l'opposé, les zones les plus connectées sont situées au dessus de cette altitude. Le relief montagneux de cet 'axe volcanique central' agit sans doute comme un obstacle naturel à l'extension urbaine et au développement de l'agriculture et a permis de préserver jusqu'à présent un couvert forestier. Malheureusement, durant ces 20 dernières années, la pression sur ces espaces naturels par l'agriculture (extension du domaine agricole, forte demande des marchés urbains, nouvelles technologies d'irrigation), par l'urbanisation et par l'extraction minière illégale, affecte ce corridor biologique.



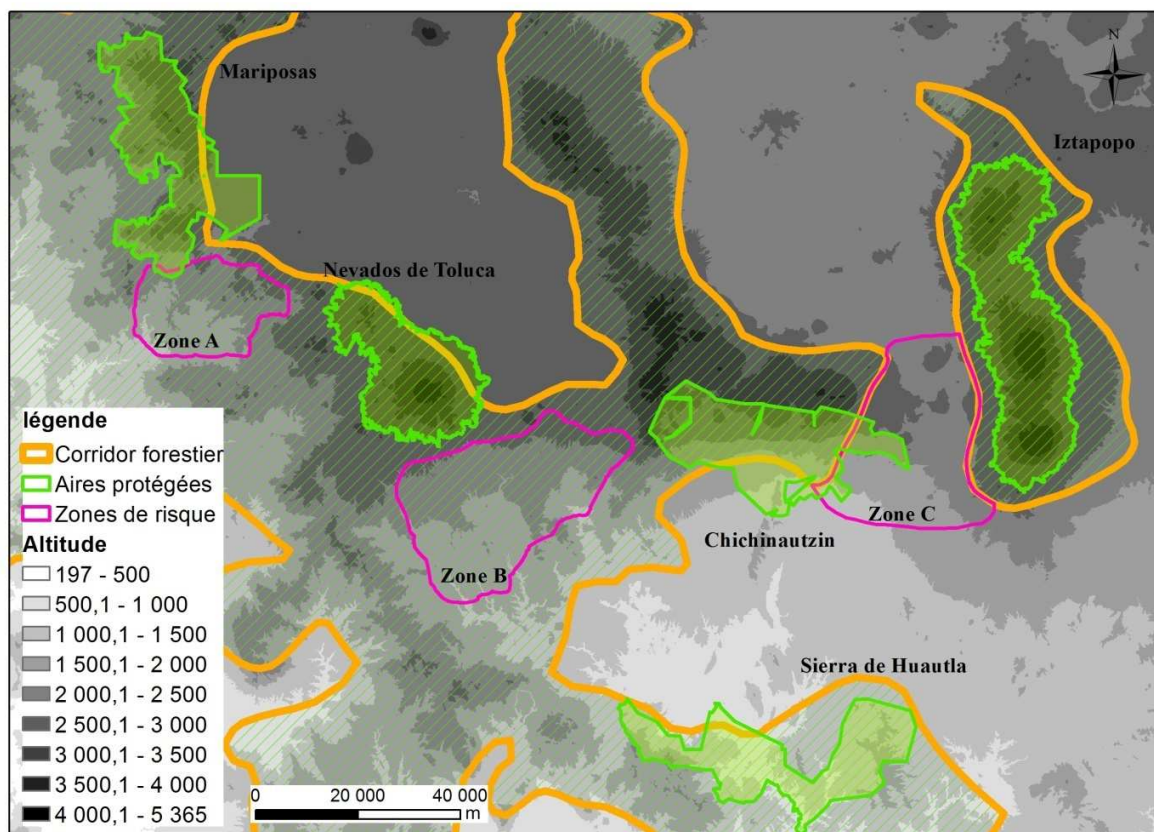
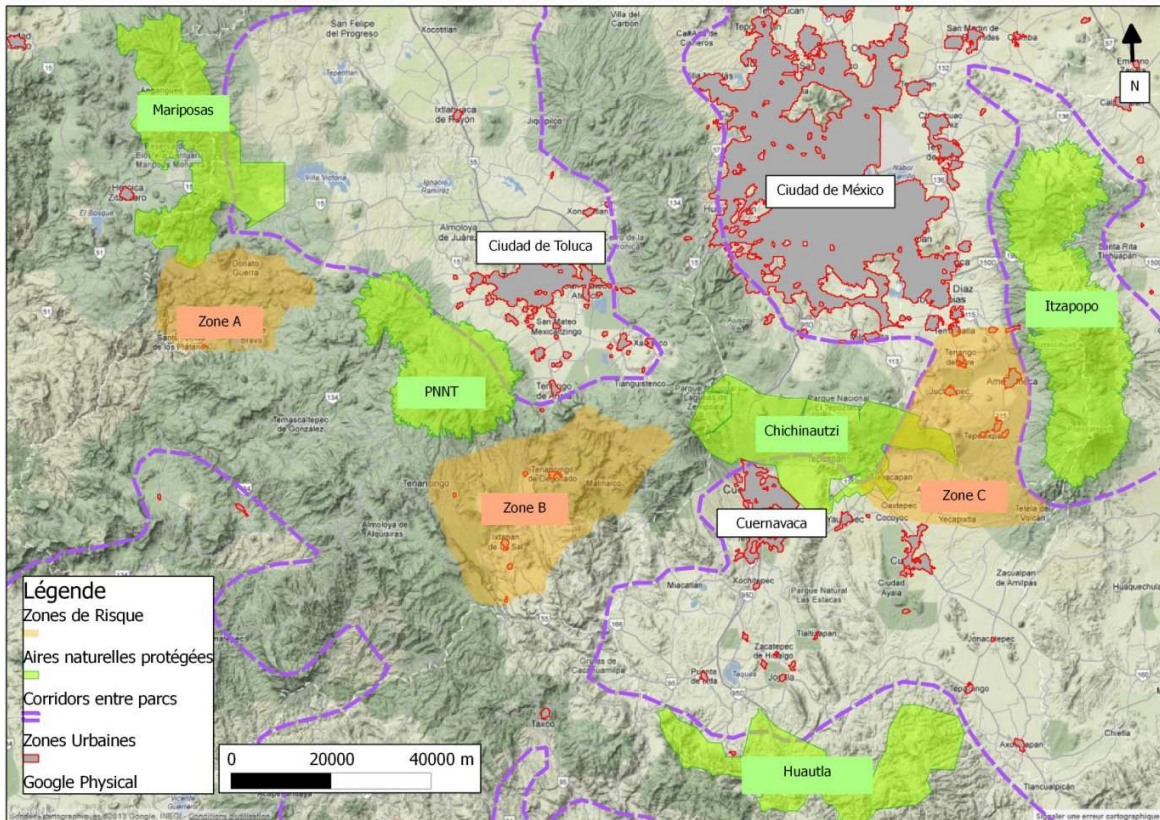


Figure 47: La connectivité forestière en lien avec le relief de la région d'étude  
Antonio Villanueva, 2013

#### 4.6.2. Les zones de susceptibilité de perte de connectivité forestier

Malgré la simplicité du modèle de percolation qui nous a permis de déterminer la connectivité de ces écosystèmes naturels, ces résultats donnent une information spatialisée intéressante pour cette zone centrale du Mexique. Ils mettent en l'évidence les zones où le susceptibilité de perte connectivité est le plus fort et les zones où il n'y a pas (plus) de connectivité. Il existe en particulier un secteur isolé qui correspond au Parc National Iztapopo : celui-ci ne présente pas de connectivité forestière avec le reste des secteurs naturels de la région (voir zone C). Dans cette zone de 'barrière' à la connectivité, les actions doivent être orientées au reboisement dans le but de reconnecter les écosystèmes forestiers.

Les zones où la susceptibilité de perte de connectivité forestière est élevée, se situent à l'Est (zone B) et à l'Ouest (zone A) du Nevado de Toluca. Ceci met en évidence le rôle de ce parc dans le corridor forestier de la région. Isoler ce parc du reste des écosystèmes forestiers de la région pourrait avoir des impacts négatifs sur l'habitat des espèces locales.



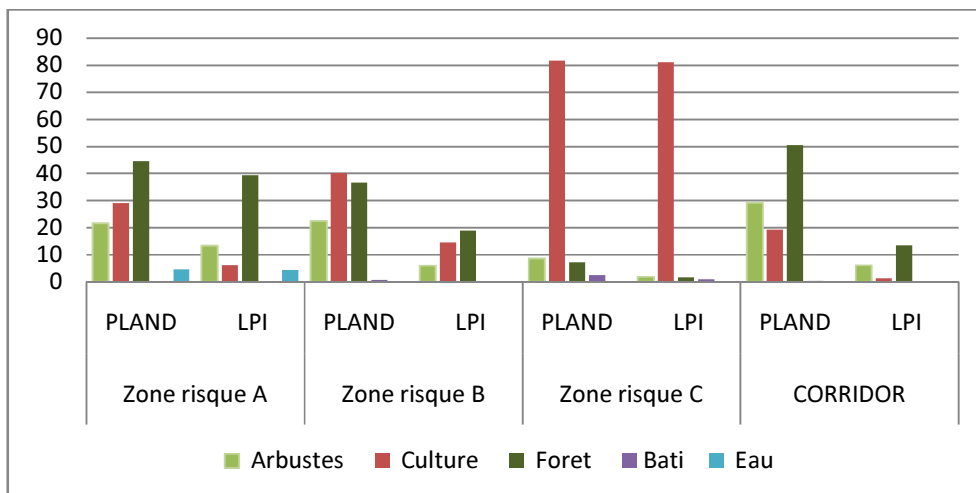
**Figure 48: Les zones susceptibilité de perte de connectivité forestière (A et B) et de barrière à la connectivité (C)**  
Antonio Villanueva, 2013

La zone qui présente la plus grande susceptibilité de perte de connectivité forestière (Figure 49) se situe aux alentours du parc du Nevado de Toluca et elle interfère dans la connectivité vers le Sud-Est, entre le Chichinautzi et le PNNT, ainsi que entre le PNNT et la Sierra de Huautla.

L'occupation des sols a été analysée dans ces 3 susceptibilités de perte de connectivité forestière à l'aide d'indicateurs : distribution des valeurs de surface (PLAND) et extension des patches par utilisation de sol (LPI). On observe sur la figure 50 que dans la zone de susceptibilité A, au Nord-Est du PNNT, la couverture forestière est majoritaire. La seconde utilisation de sol par ordre d'importance spatiale est l'agriculture.

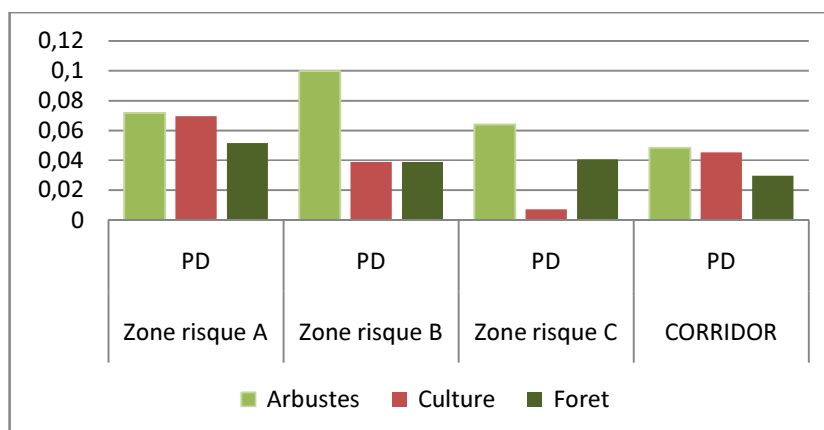
La zone de susceptibilité B présente le plus haut pourcentage d'occupation des sols par la végétation arbustive de toutes les zones à susceptibilité, mais la principale occupation des sols est l'agriculture.

Le cas le plus critique correspond à la zone C où il n'existe presque pas de couverture forestière ou arbustive. L'agriculture y est la principale occupation des sols et constitue une 'barrière' à la connexion des espaces forestiers.



**Figure 49: Occupations des sols dans les trois zones de susceptibilité pour la connectivité et dans l'ensemble du corridor forestier.**  
Source: Antonio Villanueva, 2013

L'analyse de la fragmentation forestière et arbustive dans les zones à susceptibilité de perte de connectivité forestière nous montre que la plus grande fragmentation arbustive est située dans la zone B (Sud-Est PNNT), et que la zone A (Sud Parc Mariposas) à la plus grande fragmentation forestière. Sur l'ensemble du corridor les valeurs de fragmentation du couvert forestier et arbustif restent plus faibles que dans les zones de susceptibilité (A ; B et C), ce qui à postériori valide notre évaluation des zones de susceptibilité pour la connectivité.

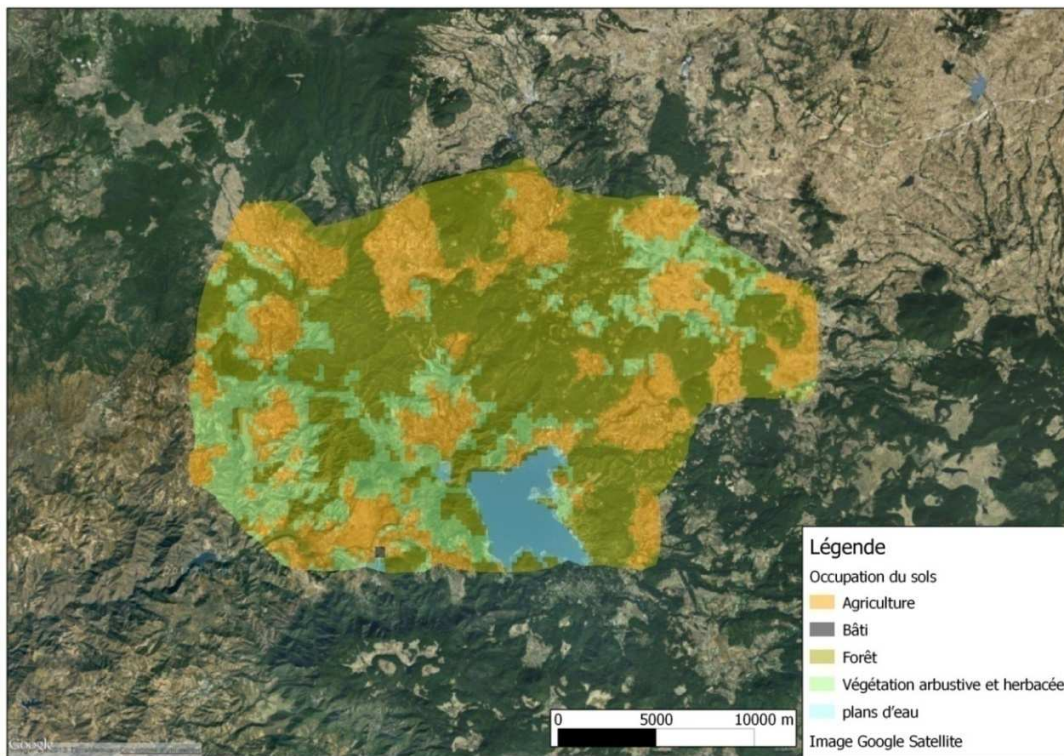


**Figure 50: Fragmentation du paysage dans les zones de susceptibilité et sur l'ensemble du corridor forestier**  
Source: Antonio Villanueva, 2013

### Zone de susceptibilité A

La zone à susceptibilité A (Figure 52) interfère, comme nous l'avons dit, dans la continuité forestière entre le Mariposas et Nevados de Toluca. Cette zone est majoritairement forestière (44%), sa fragmentation forestier se trouve sur la valeur de l'axe volcanique. L'occupation des sols la plus soumise aux pressions anthropiques est la couverture arbustive, avec un coefficient PD égal à 0.07, ce qui est la plus haute valeur dans cette région. Les valeurs de fragmentation des couverts arbustifs et agricoles sont assez proches entre eux, avec respectivement 0.070 et 0.069. La couverture agricole est 30% (PLAND) et la surface naturel plus important est l'arbustif est 21%.

D'après la Figure 52, nous pouvons interpréter qu'il existe une forte pression agricole sur l'écosystème arbustif. Cette pression serait intéressante d'évaluer avec des images capturées à différentes dates afin d'observer la dynamique.



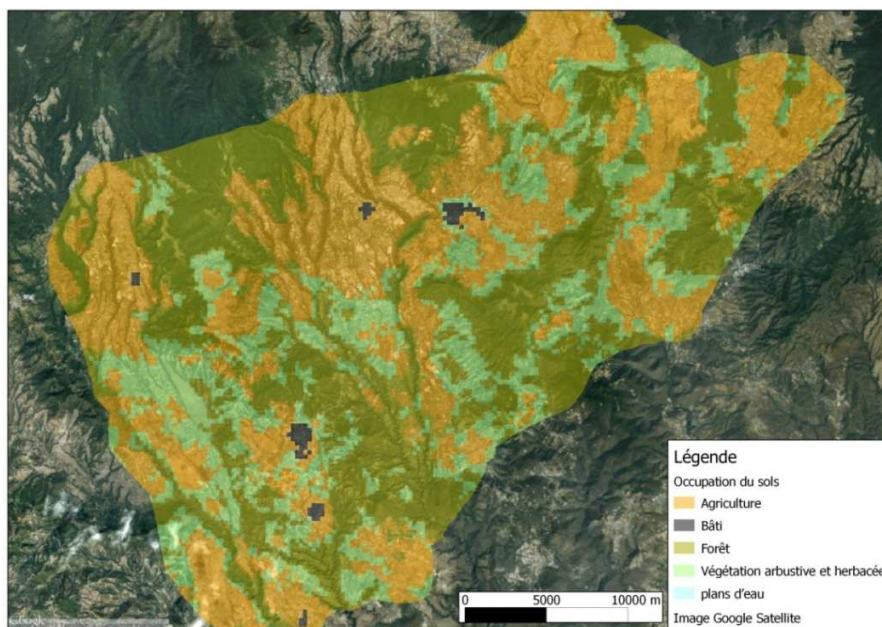
**Figure 51: occupation des sols dans la zone A**  
Antonio Villanueva, 2013

### Zone de susceptibilité B

Une analyse détaillée de cette zone montre que l'agriculture occupe 40% (PLAND) de la surface. Au niveau du corridor forestier, la surface occupée par l'agriculture n'est que de 19%. Les couverts forestiers et arbustifs n'y représentent que 59 % de la superficie de la zone alors que dans le corridor la valeur atteint 80%. La surface occupée par le bâti représente seulement 0.6% de la surface de la zone mais elle est plus importante que pour l'ensemble du corridor (0,2%). Toutefois, étant donné les faibles pourcentages, les espaces urbains ne représentent pas une menace directe pour la connectivité forestière dans cette zone (Figure 53).

L'indice de fragmentation (PD) de la forêt est égal à 0.09, soit une valeur bien plus élevée que celle du corridor (0.02). L'extension des patches de plus vaste dimension est la forestière, pour cette aire est de 18% (LPI), étant la plus importante de la zone de susceptibilité.

De ces analyses du paysage de la zone de susceptibilité A et B, on peut avancer que l'agriculture y joue un rôle fondamental dans la discontinuité forestière. L'activité horticole, dont nous avons montré l'importance dans le chapitre précédent, complique la situation car elle constitue une barrière artificielle à la connectivité. Son importance économique pour la région va limiter certainement les actions correctives d'amélioration de la connectivité de la couverture forestière.



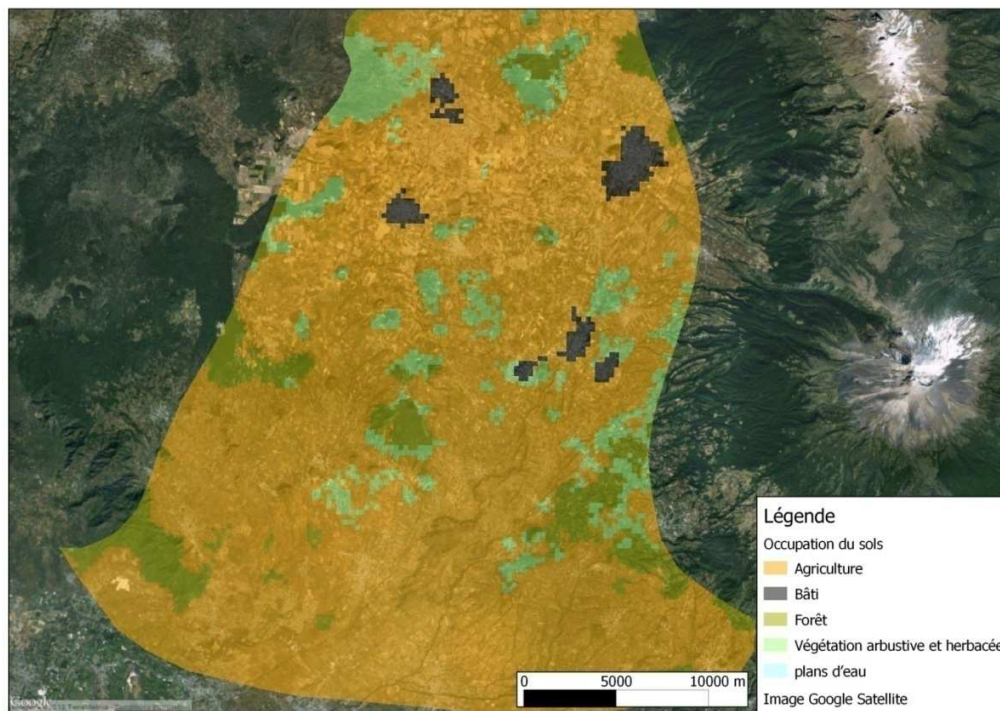
**Figure 52: Occupation des sols dans la zone de susceptibilité B**  
Antonio Villanueva, 2013

### Zone de susceptibilité C

C'est la situation la plus extrême (Figure 54) car il n'existe presque plus de forêts dans cet espace (7% de forêts et 6% de végétation arbustive). L'agriculture occupe 81% de la surface. C'est aussi la zone qui a la plus grande occupation urbaine (2.5%).

Cette situation se traduit par un isolement du parc national Itzapopo du reste des espaces naturels du corridor. Pour recréer la connectivité forestière, il serait nécessaire de mettre en œuvre d'importantes initiatives de reboisement.

Le modèle de percolation nous indique dans ce cas que pour recréer une fenêtre de connectivité dans le parc Itzapopo et le reste du corridor, il faudrait reboiser au moins 50 km<sup>2</sup>. Mais une telle initiative va nécessiter une analyse détaillée des espaces les plus appropriés pour assurer au mieux cette reconnexion.

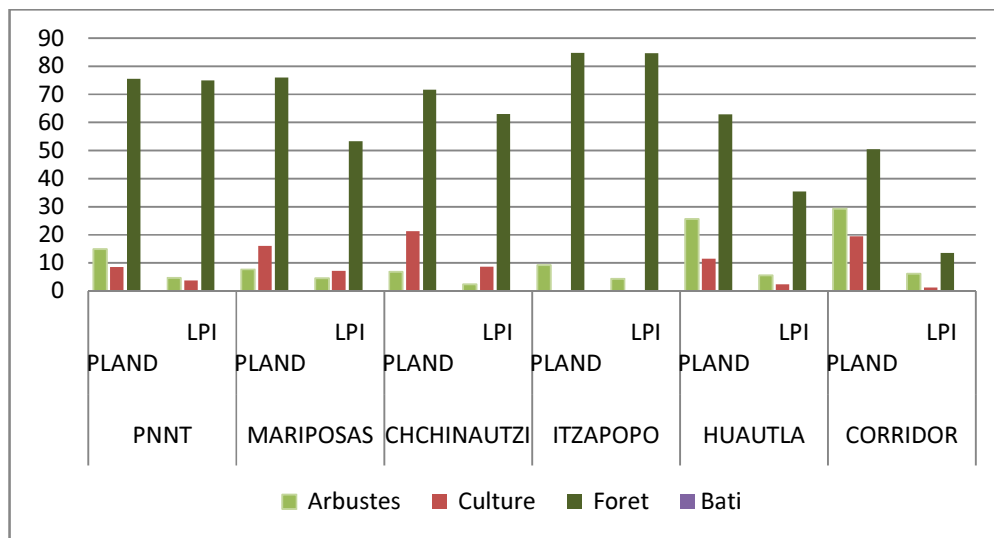


**Figure 53: Occupation des sols dans la zone de susceptibilité C**  
Antonio Villanueva, 2013

### 4.6.3. Analyse de la fragmentation forestière dans le corridor qui relie les parcs

Les résultats de l'analyse des indicateurs de paysage dans le corridor illustrent l'intérêt et le rôle de ces zones protégées que sont les parcs pour conserver la forêt natif et ses espèces endémiques (Figure 55).

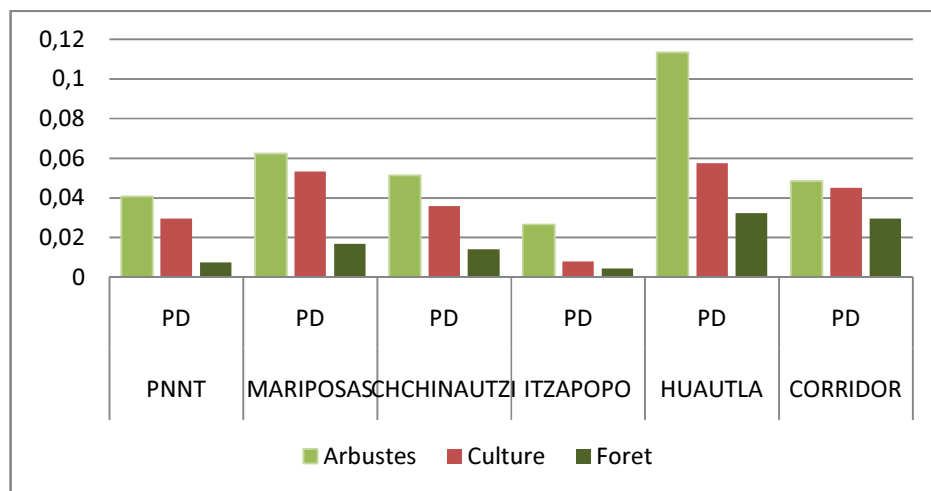
Dans le graphique suivant, nous pouvons observer que la couverture forestière dans les parcs est bien plus importante qu'à l'échelle du corridor. Toutefois, tous ces parcs, à l'exception du Parc isolé Itzapopo, ont une activité agricole qui peut représenter jusqu'à 20% de leur surface.



**Figure 54: Occupation des sols dans les Parcs et dans le corridor forestier**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

La fragmentation forestière de ces parcs est inférieure à la fragmentation forestière du corridor de l'axe volcanique central (Figure 56), à l'exception du Parc Sierras de Huautla qui a une fragmentation légèrement supérieure. Pour les écosystèmes arbustifs, les indicateurs de fragmentation sont plus élevés. Ces espaces semblent être plus exposés aux pressions anthropiques.

Actuellement, les principales barrières à la connectivité dans ce corridor sont la présence de routes qui traversent cet espace.



**Figure 55: Fragmentation du paysage des Parcs et du corridor forestier**  
Source : Antonio Villanueva, 2013

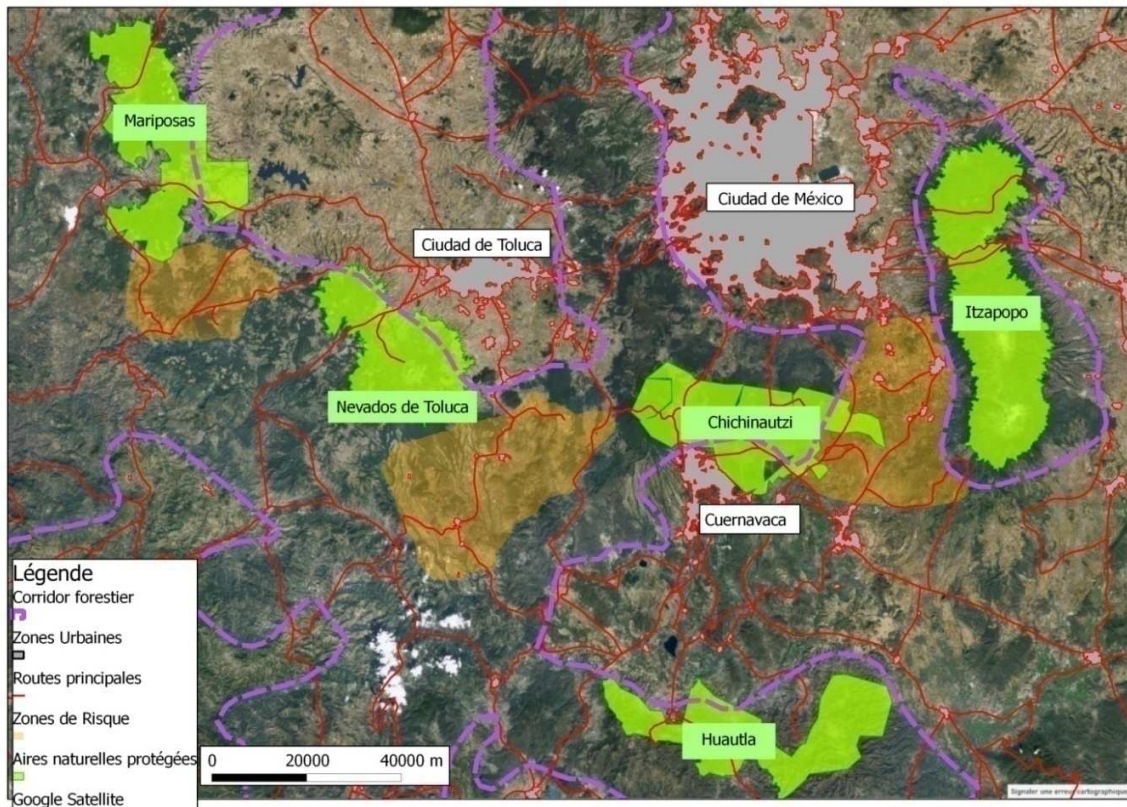
#### ***4.6.4. Les pressions exercées par l'activité de l'homme***

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 57, de nombreuses perturbations anthropiques peuvent être identifiées : routes principales qui traversent le corridor, zones urbaines qui s'étendent – surtout depuis la zone nord vers le sud.

Bien sûr, la ville de Mexico elle-même exerce une pression sur le corridor entre Chichinautzi et l'Itzapopo. Mais dans le secteur Nord, le Parc du Nevado est aussi menacé par la ville de Toluca.

Au sud de la région, on observe une région qui subit moins de pression urbaine, à l'exception de la ville de Morelos dans la limite septentrionale du Chichinautzi. Toutefois, la présence d'autoroutes constitue des barrières à la connectivité forestière. Ces barrières n'ont pas été prises en compte dans le modèle de percolation actuel.





**Figure 56: Les barrières à la connectivité que constitue le réseau routier.**  
 Source: Antonio Villanueva, 2013

#### **4.6.5. Discussion**

L'analyse de la fragmentation des paysages du corridor forestier nous donne des résultats intéressants et permet de mettre en évidence les relations entre les activités anthropiques dans cet espace. Les zones où la fragmentation du couvert forestier est la plus grande correspondent à une importante activité humaine, principalement agricole. Cette analyse nous a permis d'identifier les zones les plus vulnérables (appelées « zones de susceptibilité ») pour la discontinuité forestière. L'identification de ces zones devrait permettre d'établir des priorités territoriales d'intervention pour la protection des écosystèmes forestiers.

Parmi les 'barrières' à la continuité forestière, nous n'avons considéré dans cette étude que les routes les plus importantes. Nous n'avons pas inclus dans l'analyse le type de culture par activité agricole.

Le manque d'information disponible a été un obstacle pour établir des analyses plus détaillées. Toutefois, l'agriculture est apparue comme la pression anthropique la plus forte sur le corridor forestier. Selon nous, son impact peut toutefois être atténué si des pratiques adéquates sont utilisées : l'agriculture pourrait alors être transformée un élément intégrateur des écosystèmes naturels.

L'absence de temporalité dans cette étude et la faible qualité des bases de données mobilisées limite toutefois cette étude. Elle doit être considérée comme un travail exploratoire sur la fragmentation et la connectivité de la forêt dans l'axe volcanique central. Il est envisagé d'approfondir ce travail de recherche dans le cadre d'une thèse de doctorat. Cette thèse devrait permettre d'associer un travail de terrain (observations et enquêtes) et de prendre en compte les politiques publiques en matière de paiements pour services environnementaux.

## **5. Modélisation spatiale des principales pressions**

### **anthropiques étudiées**

Ce chapitre a comme objectif de représenter, de manière intégrée, les différents résultats obtenus. Pour gérer l'intégration, il nous a semblé pertinent d'appliquer un modèle thématique, qui simplifie les structures et les processus spatiaux dans la zone d'étude.

Il nous a semblé intéressant d'utiliser les modèles appelés « Chorèmes » (Brunet, 1980) pour analyser et représenter les différentes logiques des territoires. L'avantage de cette modélisation est de permettre une analyse des phénomènes spatiaux, à partir de sept éléments simples : les chorèmes. Les deux premiers (le maillage et le quadrillage), expriment les moyens de communication et les réseaux; les cinq autres (la gravitation, le contact, le tropisme, la dynamique), représentent certains effets particuliers du maillage et du quadrillage, mais, aussi les dynamiques évolutives de l'espace. La représentation « chorématique » se base essentiellement sur des points, des lignes, des aires et des réseaux (André, et al. 1990).

Pour notre étude, nous avons utilisé un modèle simplifié de l'organisation du paysage et des pressions anthropiques (activité minière et agricole en serre) à la périphérie du PNNT, en lien avec la fragmentation et la connectivité du corridor forestier. *« Un modèle est toujours une simplification de la réalité, ou plus exactement de la vision qu'on a de cette réalité. Cette simplification est faite dans un but opératoire de l'action, de la prédiction, ou de l'explication »* (Brunet, 1980).

Les éléments, avec lesquels, nous avons représenté les phénomènes structurels et les pressions anthropiques, étudiés, dans cette recherche, a été basé, sur les règles définies, par la chorématique de Brunet. On a pris certains principes de cette géométrie et nous avons adapté la représentation aux phénomènes de la zone d'étude (Figure 58).

	POINT	LIGNE	AIRE	RESEAU
maillage				
	chef-lieu	limites administratives	Etat, région...	centres, limites et polygones
quadrillage				
	tête de réseau carrefour	voies de communication	aire de desserte irrigation, drainage	réseau
attraction				
	points attirés satellites	lignes d'isotropie orbites	aire d'attraction	liasons préférentielles
contact				
	point de passage	rupture, interface	aires en contact	base tête de pont
tropisme				
	flux directionnel	ligne de partage	surfaces de tendance	dissymétries
dynamique territoriale				
	évolutions ponctuelles	axes de propagation	aires d'extension	tissu du changement
hiérarchie				
	semis urbain	relation de dépendance limites administratives	sous-ensemble	réseau made

Figure 57: La grammaire chorématique de Brunet  
Source : (Brunet, 1980).

Basé sur la grammaire chorématique de Brunet, nous avons fait un modèle en utilisant les figures suivantes qui représentent l'structure, les flux et processus étudiés dans la zone d'étude. (Figure 59)










<b>Aires</b>	Zone agricole	
	Couverture forestier	
<b>Zones d'influence</b>	Pole urbaine	
<b>Barriere</b>	Routes	
<b>Fluxes</b>	Corridor forestier	
<b>Centre-périphérie</b>	Aire naturel protégée	
<b>Perturbation</b>	Pression Urbaine	
	Pression minière	
	Pression agricole	

Figure 58: Grammaire de Chorèmes utilisées pour le modèle de synthèse  
Source: Antonio Villanueva, 2013

## 5.1. Le corridor forestier et les parcs naturels protégés

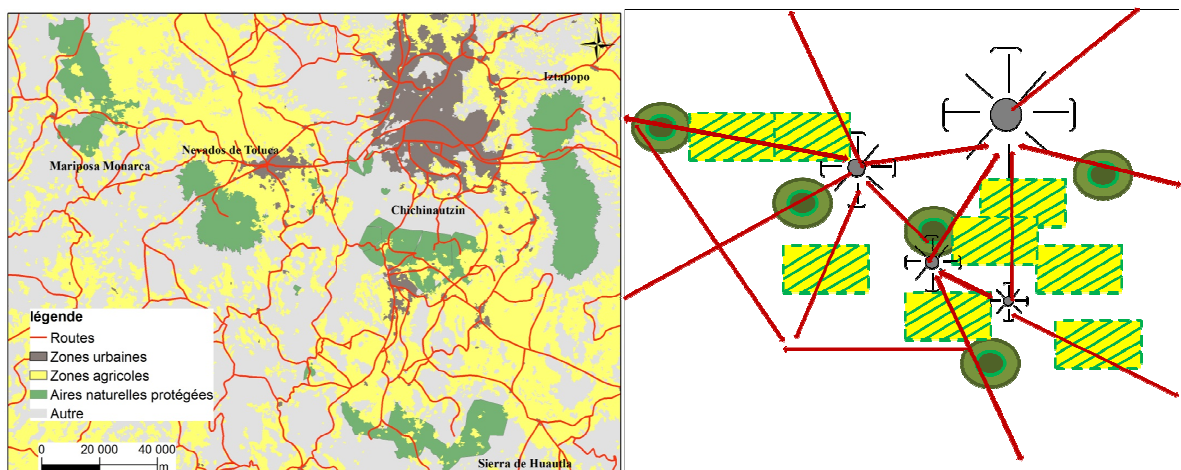
Dans la figure suivante (Figure 60), nous pouvons observer la représentation des structures : le Corridor forestier et les parcs naturels, où les figures géométriques ovales correspondent à la couverture forestière. Les cercles représentent les aires naturelles protégées et les flèches la fonction du corridor. Les lignes segmentées représentent les parcs et les corridors qui sont flexibles en ces limites. Au point de vue des pressions atrophiques, elles peuvent pénétrer le corridor forestier et les parcs. Par ailleurs, les parcs ont une représentation, de centre-périphérique, car les périphéries des parcs sont les plus affectées pour les pressions anthropiques que les centres des ces aires naturelles. Nous pouvons prendre, en exemple, le PNNT et l'activité minière, ou bien, les serres et les activités vues, dans les chapitres précédents.



**Figure 59: Chorèmes du corridor forestier et des aires naturelles protégées**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

## 5.2. Zones agricoles routes et zones urbaines

Dans la Figure 61, nous observons, à droite, la représentation des zones urbaines, avec des cercles et des flèches, qui représentent l'influences urbaines et pression urbaine. 4 villes y sont représentées. La plus importante correspond à la ville de Mexico DF. Cela se voit, par la couleur jaune qui segmente les zones agricoles, de couleur verte, distribuées dans toute la zone d'étude. Pour une limitation de l'information, il est représenté les zones agricoles saines, qui sont différenciés des autres types de culture. Aussi, dans ce modèle, il est représenté les routes, avec de flèches rouges, lesquelles, représentent les flux (populations, communications et commerciaux). Les routes passent par toutes les aires naturelles et connectent tous les villes importantes entre eux.



**Figure 60: Chorèmes des zones urbaines et zones agricoles**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

### 5.3. Les routes comment barrières du corridor forestier

Dans la Figure 62, nous pouvons constater, malgré que les routes soient des voies de connectivité entre les villes et les parcs, elles sont aussi des éléments de barrière de la connectivité forestière de l'axe volcanique central. Ces barrières traversent le corridor dans le trois bras de connectivité du PNNT, dans la zone Ouest (Mariposas-PNNT), le côté Sud (Sierra de Huautla-PNNT) et le bras Est (Chichinautzin-PNNT).

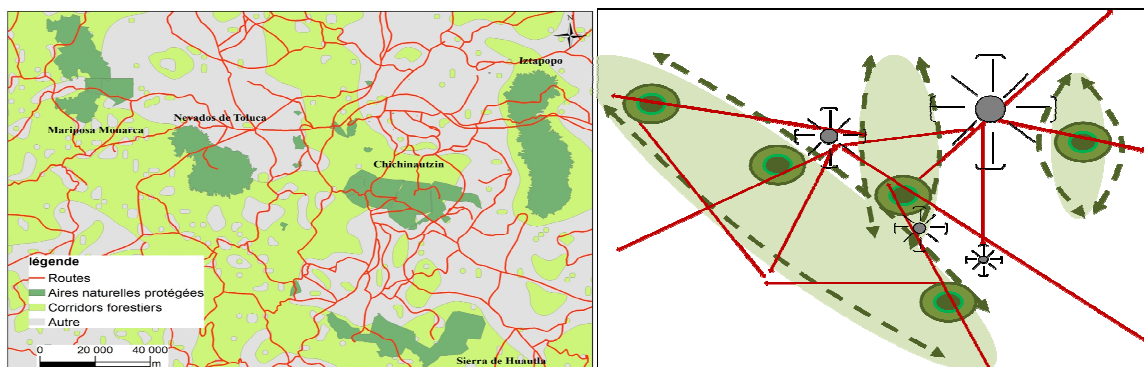


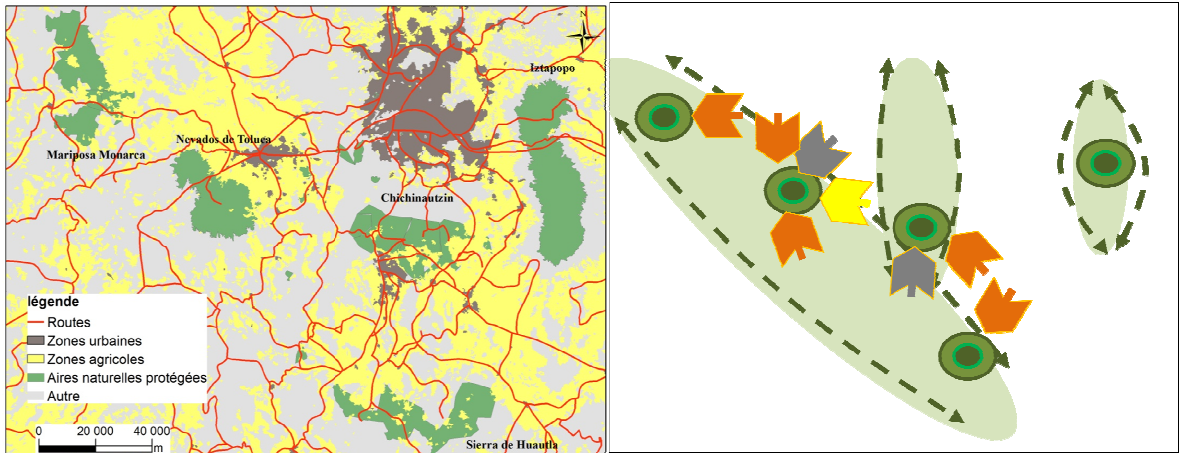
Figure 61: Chorèmes des routes comment barrière du corridor forestier  
Source : Antonio Villanueva, 2013

### 5.4. Pressions anthropique et intégrations de variables

Dans la Figure 63, nous observons, des pressions anthropiques analysées, dans cette recherche. Cette dernière se limite aux principaux types de pressions anthropiques sur les PNNT, (minièrre et agricole en serre). Nous avons identifié des zones, avec des pressions urbaines, par rapport à sa proximité des zones protégées :

- \_ En couleur gris, il est représenté la pression urbaine.
- \_ En couleur orange, il est représenté la pression agricole avec la présence de l'activité en serre, mais qui n'ont pas été évaluées dans ce travail.
- \_ En couleur jaune, la pression de l'activité minièrre (considérée seulement pour le PNNT).

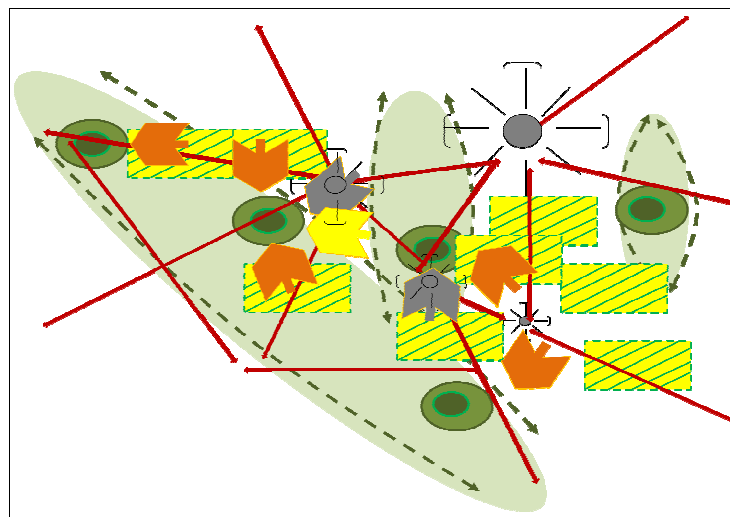
Pour faire une analyse, plus complète, des pressions anthropique, dans les corridors forestière, et l'ensemble des parcs naturels, il est vraiment important de considérer une analyse, en détail de chaque parc et par type d'activité (minièrre, agricole, étalement urbain). Donc, cette partie reste, dans une approche superficielle et incomplète, au moment de déterminer, vraiment la magnitude des pressions anthropique, en la zone d'étude.



**Figure 62: Chorèmes des pressions anthropiques sur les aires protégées**  
 Source : Antonio Villanueva, 2013

La Figure 64, suivante montre l'intégration, de toutes les variables considérés, pour la représentation chorématique. Enfin, ce modèle met en évidence une asymétrie spatiale Nord/Sud, où la zone Nord-Est est soumise à la pression des centres urbains (Figure X) ; l'activité agricole, et plus particulièrement, la floriculture, horticulture et fruiticulture, se concentrent dans la zone Sud.

Les caractéristiques environnementales du secteur d'étude et les logiques de développement territorial existants, donnent une variété d'impacts environnementaux, dans les différents pôles de gravitation. Ceci facilite l'établissement de secteurs prioritaires, pour l'intervention, la protection, et le contrôle des pratiques agricoles et de l'extraction des minéraux de construction.



**Figure 63: Chorèmes intégrée représentant des pressions anthropiques sur le corridor forestier de l'axe volcanique central du Mexique**  
 Source: Antonio Villanueva, 2013



## 5.5. Discussion

L'intégration des variables, dans le modèle chorématique, montre une synthèse partielle, des pressions anthropiques, car dans cette recherche, il est évalué les pressions anthropiques, liées seulement au PNNT. Mais, dans la révision bibliographique et l'observation des images de GoogleMaps, nous avons noté qu'il y avait la présence de serre, dans la zone Nord, entre PNNT-Mariposas Monarcas. Aussi, l'activité agricole et urbaine, dans les parcs Chichinautzi, sont très proche entre elles, et parfois, il existe, dans le même parc, des zone urbaines. Donc, en générale, les parcs sont remplis, principalement, par des zones forestières natives. C'est pour cela que des zones urbaines et agricole, proches aux parcs, sont considérées comme des éléments de pression, de zones naturelles protégées. Par ailleurs, les routes sont des éléments qui intègrent les parcs, les villes, avec des parcs. Ils sont des éléments qui traversent le couloir forestier, en toute part. Cette réalité peut avoir des dommages, dans la biodiversité forestière, mais, dans certains cas, les routes fonctionnellement sont des connecteurs de biodiversité. C'est pour cette raison que l'analyse routière, comme éléments de barrière, est intéressant dans le cas de l'axe volcanique central du Mexique.

## 6. Bibliographie

- 2000AGRO. (2005). *2000AGRO Revista Industrial del Campo*. Recuperado el 22 de 3 de 2013, de <http://www.2000agro.com.mx/>:  
<http://www.2000agro.com.mx/agroindustria/marchita-floricultura-medio-ambiente/>
- Amor, Sofiane Ben, and Marc Bui. (2009). "Généralisation Des Processus de Percolation Discrets." *PercoPretopoStudia*
- Amor, Sofiane Ben, Ivan Lavallée, and Marc Bui. (2013) "Complexité, Percolation et Optimisation Stochastique." Accessed  
[https://www2.lirmm.fr/lirmm/interne/BIBLI/CDROM/INFO/2006/ROADEF\\_2006/Abstracts/182.pdf](https://www2.lirmm.fr/lirmm/interne/BIBLI/CDROM/INFO/2006/ROADEF_2006/Abstracts/182.pdf).
- André, Y., Bailly, A., Clary, M., & Guerin, R. F. (1990). Modèles graphiques et représentations spatiales. *Anthropos, Economica* , 217.
- Barredo, J., & Gómez, M. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid.
- Bennet, A. F., Henein, K., & Merriam, G. (1994). Corridor use and the elements of corridor quality: chipmunks and fecerows in a farmland mosaic. *Biological conservation* (68), 155-165.
- Bennett, A. F. (1990). Habitat corridors: Their role in wildlife management and conservation. (A. Rylah, Ed.) *Depart. Conservation and Environment* .
- Blanc-Pamard, C., & Ramiarantsoa, H. R. (2008). La gestion contractualisée des forêts en pays betsileo et tanala (Madagascar). *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]* , 426.
- Botequila, A., Miller, J., & McGarigal, K. (2006). *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Washington, DC: Island Press.
- Brenner, Ludger. (2006) "Áreas Naturales Protegidas y Ecoturismo: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposas Monarca, México." *Relaciones. Colegio de Michoacán XXVII*, no. 105. 237–265.
- Bunn, A.G, D.L Urban, and T.H Keitt. (2000) "Landscape Connectivity: A Conservation Application of Graph Theory." *Journal of Environmental Management* 59, no. 4 265–278. doi:10.1006/jema.2000.0373.
- Burel, F., & Baurdry, J. (1999). *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Paris, france: Thechnique et Documentation.
- Cavieres, M. F. (2004). Exposición a pesticidas y toxicidad reproductiva y del desarrollo en humanos. Análisis de la evidencia epidemiológica y experimental. *Revista Médica de Chile* , 132 (7), 873-879.
- Clergeau, P., & Désiré, G. (1999). Biodiversité, paysage et aménagement: Du corridor à la zone de connexion biologique. *Mappemonde* (55), 19-23.

- Cushman, Samuel A., and Kevin McGarigal. (2003) "Landscape-level Patterns of Avian Diversity in the Oregon Coast Range." *Ecological Monographs* 73, no. 2. 259–281.
- Dajoz, R. (1996). *Précis d'écologie* (6<sup>e</sup> ed.). Paris, France: Dunot.
- Debray, A. (2011). La notion de réseau écologique en France : construction scientifique, appropriation par les politiques publiques et traduction territoriale », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Débats et Perspective*.
- Décamps, H., & Décamps, O. (2007). Organisation de l'espace et processus écologiques. *Économie rurale*, 297-298.
- Estado de México. (2011). *Hacia una entidad de conocimiento, el desarrollo tecnológico y la innovación con ventajas comparativas y competitivas para las empresas, los negocios y el bien estar social. Estudio sectorial Flores y horticultura ornamental*. Informe técnico, Mexico.
- Forman, R. T., & Godron, M. (1981). Patches and Structural Components for a Landscape Ecology. *BioScience*, 31 (10), 733-740.
- Forman, Richard TT. (1995) "Some General Principles of Landscape and Regional Ecology." *Landscape Ecology* 10, no. 3 133–142.
- . "Some General Principles of Landscape and Regional Ecology." *Landscape Ecology* 10, no. 3 (1995): 133–142.
- García, G. (1999). Investigaciones al día: Floricultura en México y entorno mundial. *Revista Proyecciones*, 1 (1).
- Godron, M., & Forman, R. (1983). Landscape modification and changing ecological characteristics. Pp. 12-28 in: *Disturbance and Ecosystems: Components of Response* (H.A. Mooney and M. Godron, eds.), *Disturbance and ecosystems*, *Ecological Studies* (44), 13-28.
- Gomora, J., Sánchez, J., Pacheco, V., Pavón, T., & Salvador Adame, B. B. (2005). Integración de indicadores de desempeño ambiental para la producción florícola.
- H.ayuntamiento de Villa Guerrero. (2008). *Plan de Desarrollo Municipal 2009-2012*. H.ayuntamiento de Villa Guerrero, Villa Guerrero.
- Haines-Young, R., Green, D. R., & Cousins, S. (1993). *Landscape ecology and Geographic information systems*. London: Taylor and Francis.
- Hernández, M.A., and D. Granados (2006) "El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro." *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 12, no. 002. 101–109.
- Imbernon, J., Villacorta, J., Zelaya, C., & Valle, A. (2005). Fragmentación y conectividad del bosque en el Salvador, aplicación al corredor Biológico Mesoamericano». *Bois et Forêts des Tropiques* ( N° 286), pp. p. 15-28.
- INEGI. (2010). *INEGI. Censo de Población y Vivienda. Cuestionario básico*. Instituto Nacional de Estadísticas, México.

- Kimberly, Y., & With, A. (1995). Critical Thresholds in species responses to landscape structure. *Ecology*, 76 (8), 2446-2459.
- Lara, S. (1997). Des fleurs à exporter. Flexibilité productive et trajectoires de travail au Mexique. *Cahiers des Amériques Latines* (25), 131-148.
- Last, J., & Thouless, J. (1971). Percolation Theory and Electrical Conductivity. *Physical Review Letters*, 1719-1721.
- Maass, Sergio, Héctor Regil, and Carlos González. (2006) “Cambios de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000.” *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* no. 61 38–57.
- McGarigal, Kevin, and Samuel A. Cushman. (2002). “The Gradient Concept of Landscape Structure: Or, Why Are There So Many Patches.” *Available at the Following Websites: <http://www.umass.edu/landeco/pubs/mcgarigal.cushman.2005.pdf>*.
- Makhdoum, Majid F.(2008) “Landscape Ecology or Environmental Studies (Land Ecology) European Versus Anglo-Saxon Schools of Thought.” *J. Int. Environmental Application & Science* 3, no. 3. 147–160.
- Malczewski, J. (2006). A GIS-based multicriteria decision analysis : A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (7), 703–726.
- Observatorio Latinoamericano de Salud. (2005). *Informe alternativo sobre la salud Saludmerica Latina*. Consejo Internacional de Salud de los Pueblos. Quito, Ecuador: Facultad de de Ciencias Médicas, Universidad de Cuenca.
- OMS. (2010). Código Internacional de Conducta sobre la Distribución y Utilización de Plaguidas.
- Orozco, M. (2007). Entre la competitividad local y la competitividad global: Floricultura comercial en el estado de México. *Convergencia. Revista de ciencias sociales*, 14 (45), 111-160.
- Orozco, M., Campos, E., & Guerrero, A. (2009). Hacia la Gestión de un nuevo desarrollo rural: El caso de los pequeños productores de flor en Villa Guerrero, México. *Revista Quívera*, 11 (1), 91-102.
- Otero, G., Porcayo, R., Aguirre, D., & Pedraza, M. (2000). Estudio Neuroconductual en sujetos laboralmente expuestos a plaguicidas. *Revista internacional de contaminación ambiental* (16), 67-74.
- P. Vincke. (1994). Comment choisir une méthode d’aide à la décision ? *Cahiers du CERO* (36), 339–343.
- Páez, A. C., Hernández, Z. T., & Román, I. P. (2011). Competitividad y sustentabilidad a través de la innovación tecnológica: Caso de productores del sector floricultura del pueblo San Andrés Totoltepec, Tlalpan. *Sociedades rurales, Producción y Medio Ambiente*, 11 (22).

- Pérez-Rea, María de la Luz, Jaime Horta-Rangel, Carlos Santiago López-Cajún, Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza, and Víctor Manuel Castaño (2009) “Modelo Híbrido de Percolación y Elemento Finito Para El Análisis Micromecánico de Suelos.” *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26, no. 2. 335–346.
- Pickett, S. T. A., and M. L. Cadenasso (January 1, 2002) “The Ecosystem as a Multidimensional Concept: Meaning, Model, and Metaphor.” *Ecosystems* 5, no. 1 1–10. doi:10.1007/s10021-001-0051-y.
- Pizano, M. (2002). *Pasteurización y Manejo Integrado de Plagas. Alternativas al Bromuro de Metulo en la Floricultura*. Dirección Nacional del Medio Ambiente , Comisión Técnica Gubernamental de Ozono, Uruguay .
- Ramade, F. (2005). *Éléments d'Écologie. Écologie appliquée*.
- Rojas, A., Ojeda, M., & Barraza, X. (2000). Malformaciones congénitas y exposición a pesticidas. *Rev Méd Chile* (128), 399-404. .
- Sánchez, R. (2001). *La toma de decisiones con múltiples criterios: Un resumen conceptual y teórico*. Documentos de Trabajo, CEPLAG-UMSS. Centro de planificación y Gestión Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.
- SERMARNAT. (2010). *Indicadores Básicos del Desempeño ambiental de México*. México.
- SERMARNAT. (2012). *Informe de la situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales*. Mexico .
- Skupinski, G., BinhTran, D., & Weber, C. (2009, mars 12 ). Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]* .
- Valdez, B., García, E., Cobo, J., & López, G. (2000). Impacto de los Plaguicidas en la salud de los habitantes del valle de Mexicali, México. (H. F. Aguilar, Ed.) *Revista de Ecología Latinoamericana* , 6 (3), 15-21.
- Vincke, P. (1989). L'aide multicritère à la décision. 179.
- Vila Subirós, Josep, Diego Varga Linde, Albert Llausàs i Pascual, and Anna Ribas Palom. (2006). “Conceptos y Métodos Fundamentales En Ecología Del Paisaje (landscape Ecology). Una Interpretación Desde La Geografía.” *copyright Documents d'Anàlisi Geogràfica, 2006, Núm. 48, P. 151-166*  
<http://dugi-doc.udg.edu:8080/handle/10256/1824>.