

Ecole Normale Supérieure de Lyon  
Ecole Doctorale 483

# INFORMATION SPATIALE, TERRITOIRES ET ENVIRONNEMENT

Téledétection spatiale et systèmes d'information géographiques  
appliqués aux pays du Sud

Mémoire sur travaux en vue de l'obtention  
de l'Habilitation à Diriger des Recherches

## Parcours et travaux scientifiques

Jacques IMBERNON

*Jury : Arnould Paul, Bret Bernard, Joliveau Thierry, Golay Francois,  
Kerr Yann, Tonneau Jean-Philippe*

# TABLE DES MATIERES

<b>Préambule</b>	<b>4</b>
<b>1 Regards critiques - de la physique du signal à la cartographie participative</b>	<b>7</b>
1.1 Le 'mirage' des signatures spectrales dans le domaine optique	7
1.2 Les promesses des méthodes de classification d'images	13
1.3 L'élargissement du spectre électromagnétique à l'infrarouge thermique et aux micro-ondes	19
1.4 L'apparition de la très haute résolution spatiale	22
1.5 Vérités et mensonges du traitement des données satellitales. La fonction du terrain	24
1.6 La cartographie participative et l'intégration de savoirs locaux	26
1.7 L'instrumentalisation de l'analyse spatiale par les SIG	28
1.8 La diffusion et la socialisation de l'information	30
<b>2 Un objet privilégié : l'occupation des terres, et ses implications</b>	<b>33</b>
2.1 De quoi parle-t-on ?	33
Les concepts de <i>land cover</i> , <i>land use</i> et <i>land use planning</i>	33
Les changements d'utilisation des terres	34
Les «driving forces» des changements d'utilisation des terres	36
2.2 La déforestation tropicale par les agricultures sur brûlis dans les grands bassins forestiers tropicaux	37
L'importance du processus de déforestation	38
Le lien entre déforestation et environnement global	40
L'agriculture sur brûlis, facteur de déforestation	42
Le projet Alternatives to Slash-and-Burn (ASB)	45
2.3 La pression sur les hautes terres du mont Kenya	51
Evolution de l'occupation des terres	53
Analyse comparative et interactions entre les territoires	56
2.4 L'impact des politiques publiques, des marchés et des migrations sur l'occupation des terres en El Salvador	57
Les dynamiques contradictoires du couvert forestier, entre déforestation et reforestation	59
La montée du café en altitude	70
L'expansion des centres urbains	75
Quelques facteurs explicatifs des dynamiques observées	79
2.5 L'impact environnemental des populations réfugiées en Guinée forestière	82
La question des réfugiés en Guinée forestière	83
Quelle méthode pour évaluer l'impact des populations réfugiées	87
L'évolution du couvert forestier dans les régions d'accueil de réfugiés	89
L'insertion des réfugiés dans l'économie régionale	91
L'insertion des réfugiés dans les structures productives en milieu rural.	92
<b>3 Un niveau d'intégration pertinent : la fragmentation et la connectivité des paysages</b>	<b>96</b>
3.1 Mobilisation de concepts de l'écologie du paysage	97
Structure et fonctionnement du paysage	97
Transformation des paysages et dynamiques spatiales	98
Fragmentation du paysage	98
Indicateurs de structure du paysage	99
Connectivité et corridors biologiques	99

<b>3.2 Fragmentation des paysages sur des « frontières agricoles » des grands bassins forestiers tropicaux</b>	<b>100</b>
Les images satellitales	100
Les indicateurs spatiaux de fragmentation	100
Analyse comparative entre les sites de déforestation	103
Analyse spatio-temporelle des indices spatiaux sur le site de Theobroma	109
<b>3.3 Fragmentation et connectivité des forêts dans le corridor biologique méso-américain</b>	<b>114</b>
La fragmentation du couvert forestier	116
Connectivité du couvert forestier et proposition de corridor biologique méso-américain	121
Scénarios d'évolution du couvert forestier et impact sur la connectivité.	123
<b>4 Une nouvelle gamme de concepts et d'outils : les systèmes d'information en appui au développement territorial et à la gestion des ressources naturelles</b>	<b>125</b>
<b>4.1 Des concepts liés au développement territorial</b>	<b>125</b>
Développement territorial et développement durable	125
Décentralisation	126
Gouvernance	127
<b>4.2 Un exemple de système d'information pour une commune en Haïti</b>	<b>127</b>
Le cycle de conception du SI et ses étapes	128
La base de données	131
La cartographie participative à partir d'une image satellitale à très haute résolution	132
<b>4.3 Un exemple de systèmes d'information dans une région transfrontalière d'Amérique centrale</b>	<b>137</b>
Perception des ressources naturelles de la zone du Trifinio par les acteurs locaux	139
Structure du système d'information et transfert dans les communes	143
Formation des utilisateurs locaux et diffusion de l'information	146
 <b>En guise de propos d'étape dans mon parcours scientifique</b>	 <b>147</b>
 <b>Liste des Figures</b>	 <b>150</b>
 <b>Liste des Photos</b>	 <b>153</b>
 <b>Liste des Tableaux</b>	 <b>154</b>
 <b>Références</b>	 <b>155</b>

## Préambule

Mon parcours scientifique a débuté par une thèse en hydrodynamique soutenue en 1981 à l'Institut de mécanique de Grenoble. A partir de là, l'ensemble de ma carrière s'est déroulé au Centre de coopération internationale en recherches agronomiques pour le développement (Cirad). Le fait d'évoluer dans ce centre de recherche dont le mandat porte sur les « pays du Sud » différencie mon parcours de celui plus habituel des chercheurs du Cnrs ou des Universités françaises.

Le champ géographique des recherches du Cirad couvre en effet les pays de la ceinture tropicale, et le Cirad n'intervient pas dans les pays du Nord. Travailler dans et pour les pays du Sud, c'est à la fois privilégier les applications de la recherche pour faire face aux défis auxquels sont confrontés ces pays, mais c'est aussi travailler dans des environnements parfois difficiles et souvent peu renseignés. Dès mon embauche en 1981, j'ai été immergé dans ce « bain ». La semaine même de mon entrée au Cirad, je partais en mission dans le sud du désert libyen pour optimiser la gestion de l'eau sur un vaste projet d'irrigation. Ma carrière n'a ensuite été qu'une succession de séjours à l'étranger de quelques années (Sénégal, Burkina Faso, Kenya, El Salvador) et de missions d'appui à la recherche ou d'expertise depuis la France, et ce dans une quarantaine de pays du sud.

Dans ce cadre professionnel, les activités scientifiques que j'ai menées ont été souvent collectives, dans des projets rassemblant de nombreux partenaires et des compétences thématiques diverses. J'ai réalisé aussi de nombreuses expertises individuelles, que ce soit pour la coopération française (MAE ou AFD) ou pour des institutions internationales comme la FAO, la Banque mondiale, l'Union européenne ou l'Agence spatiale européenne. Cette activité d'expertise est difficilement « classable » pour la recherche académique française. Elle m'a permis toutefois d'avoir des regards sur les questions de sociétés qui se posent dans les pays du Sud et qui nous questionnent au Cirad dans nos choix et nos priorités scientifiques. Cette double activité, entre recherche et expertise, a été à mon sens une opportunité d'ancrer des recherches sur des demandes sociales et d'éviter le risque de l'auto-programmation scientifique.

Mes activités scientifiques collectives se sont déroulées depuis une vingtaine d'années dans des groupes de recherches que j'ai souvent été amené à coordonner. Dans les années 1980, j'ai assuré la fonction de « délégué télédétection » à la Direction scientifique du Cirad, ayant en charge l'animation scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale et des SIG. Puis j'ai coordonné des projets de recherche-développement comme le projet sur l'impact environnemental des réfugiés en Guinée pour le compte du Haut Commissariat aux réfugiés (UNHCR), l'expertise collective sur la traçabilité des cafés et les paiements pour services environnementaux au Chiapas (Mexique) pour le compte de l'Union européenne, le projet de recherche Sinrem sur la gestion des ressources naturelles dans une région transfrontalière d'Amérique centrale pour le 6e PCRDT de la commission européenne, ou le développement d'un portail Web de données pour le projet LUPIS du 6e PCRDT avec 12 pays du Sud dont la Chine, l'Inde et le Brésil. Ces différents projets m'ont conduit à jouer un rôle d'interface entre des équipes de recherches du Nord et du Sud dans les projets européens ou entre des équipes de recherches du Sud dans les projets régionaux comme en Amérique centrale, et entre les différentes compétences scientifiques mobilisées, depuis la géomatique et la télédétection spatiale jusqu'à l'agronomie, la foresterie, l'hydrologie, la sociologie ou l'anthropologie.

Dans un système français de la recherche où chaque chercheur est affecté à une « case » disciplinaire dans laquelle il est ensuite évalué, l'ensemble de mes travaux pourrait être difficile à situer. J'ai mené des recherches dans des disciplines comme l'hydrodynamique des sols et l'agroclimatologie au début de ma carrière, puis je me suis spécialisé en télédétection spatiale au milieu des années 1980, avant d'aborder l'écologie du paysage puis les approches participatives. Et depuis quelques années, je me situe dans la communauté des géographes, et cela pour au moins deux raisons. D'abord, l'utilisation des outils de la géomatique (traitement d'images satellitaires et systèmes d'information géographiques) pour l'analyse spatiale qui ont été mes outils privilégiés, est largement répandue chez les géographes qui se sont appropriés les outils et les approches de l'analyse spatiale. Ensuite, et c'est ma raison principale, la géographie surtout constitue pour moi une ouverture et une science « carrefour », à la fois physique et humaine. De plus, le souci qu'ont souvent les géographes « de comparer l'objet de leurs observations à d'autres exemples », représente pour moi, chercheur sur les pays du Sud, une opportunité de valoriser des savoirs.

Pourtant, à la suite de la thèse, ma carrière a débuté par des disciplines de la physique : dynamique des fluides et micro-météorologie. Et c'est en essayant de spatialiser des mesures locales d'évapotranspiration des cultures que j'en suis arrivé à utiliser pour la première fois des images satellitaires. Avec le lancement du satellite Spot1 dans les années 80, la télédétection spatiale est devenue pour moi un domaine de recherche très attractif, à la fois plein de promesses et d'opportunités. C'était alors plus la physique du signal des capteurs qui étaient embarqués sur les satellites Meteosat, NOAA ou Spot, plus que les objets télédéteints, qui m'intéressait.

Mais après quelques années passées à traiter le signal de la télédétection spatiale pour essayer d'en dériver des variables biophysiques permettant de caractériser la surface de la terre, je suis devenu un simple utilisateur de l'imagerie satellitaire dans des recherches thématiques portant sur les espaces et leurs ressources. De fait mon parcours en télédétection spatiale peut apparaître à contre-sens de l'évolution des technologies qui produisent des capteurs spatiaux de plus en plus performants en résolution spatiale et spectrale, et des outils logiciels de plus en plus complexes pour traiter les images satellitaires acquises par ces capteurs. Vingt ans après mes débuts en télédétection spatiale, me voici dans les années 2000-2010 à photo-interpréter des images de capteurs optiques et à réaliser des cartographies participatives avec des populations locales, sans me préoccuper outre mesure du traitement du signal si ce n'est pour améliorer la localisation et la visualisation de l'image, support à l'interprétation.

Ce parcours soulèvera la critique de « télédétecteurs » dont la logique est restée l'estimation des paramètres physiques mesurés par les capteurs embarqués. Je ne me risquerai pas de mon côté à les critiquer, car ces recherches sont nécessaires et la qualité de leurs travaux a placé la France à l'avant-garde technologique dans le domaine spatial. Mais de telles recherches sur la physique du signal ne me paraissent pas être du mandat du Cirad en tant que centre de recherche appliquée pour les pays du Sud car elles ne répondent pas directement aux questions sociétales, environnementales et économiques qui nous sont posées de manière pressante sur le terrain dans les pays du Sud. Cette volonté de l'application a d'une certaine manière toujours orienté mes travaux de recherche.

Mon parcours scientifique a de fait une logique : celle d'une expérience personnelle de 30 ans de recherches sur de nombreux et divers terrains des pays du Sud. Certains vont trouver ce parcours sinueux. Je le considère pour ma part comme une véritable opportunité qui m'a permis d'acquérir des connaissances nombreuses dans des domaines différents et d'essayer de concilier des technologies spatiales mobilisant les sciences

physiques, et une géographie humaine qui s'intéresse à la manière dont l'espace observé est géré par les sociétés et dont ces sociétés influencent l'espace lui-même. Cette ouverture vers la géographie, et les sciences sociales en particulier, ne m'a pas empêché de mobiliser ces dernières années de nouvelles technologies, bien au contraire. Ainsi je me suis tourné vers les systèmes d'information, vers la très haute résolution spatiale des capteurs satellitaires et vers les services Web. C'est donc bien vers l'avenir que mon parcours et mes travaux scientifiques restent tournés. Il ne s'agit en aucune manière d'un « retour en arrière », mais plutôt d'un recours aux technologies les plus modernes pour rendre l'information utilisable et utilisée.

Au fil de ce mémoire retraçant pour partie mon parcours, j'essaierai de porter un regard critique sur les outils et les méthodes du 'spatial' pour caractériser les paysages des pays du Sud. J'essaierai aussi de montrer la cohérence de ce parcours dans l'enchaînement des travaux autour de la question suivante : « Comment représenter et analyser spatialement les situations agricoles et les processus de changement sur les terrains ? ». Je montrerai pour cela au travers de mon expérience les intérêts et les limites de l'imagerie satellitaire, les apports de l'écologie du paysage, la 'richesse' de la cartographie participative, la contribution des systèmes d'information aux actions de développement territorial et le développement d'applications sur le Web pour la diffusion de l'information.

## 1 Regards critiques - de la physique du signal à la cartographie participative

Dès les premiers satellites d'observation de la terre, puis dès le lancement du satellite Spot1 en France en 1986, la télédétection spatiale est apparue comme un formidable moyen d'acquérir de nouvelles données et une nouvelle vision de la terre. Pour le Cirad, à cette période, les principales applications se résument à la spatialisation des données acquises par les agronomes sur le terrain (en premier lieu les rendements agricoles) et à la réalisation de cartes d'occupation des terres, avec l'espoir sous-jacent de s'affranchir d'une « vérité terrain » considérée comme fastidieuse et peu valorisante.

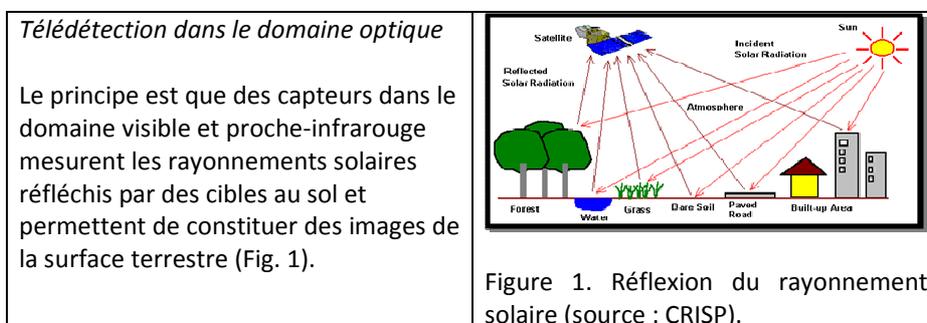
En utilisant les bases physiques du rayonnement électromagnétique et du bilan radiatif des surfaces terrestres, le traitement de ces données ouvrait en effet un domaine d'application prometteur dans l'observation et l'analyse des agricultures et des forêts des pays du Sud. Mais, après plusieurs années, mon expérience m'amène à une analyse critique pour faire apparaître à la fois les 'vérités' et les 'mensonges' que l'attrait des technologies spatiales a pu produire.

Pour les espaces ruraux des pays du Sud, je montrerai les limites de ces données et des méthodes de traitement utilisées, mais aussi leur avantage dans la caractérisation des territoires et dans l'analyse de processus spatiaux comme la déforestation tropicale. Mais pour approcher une vérité terrain bien difficile à percevoir, j'en viendrai à montrer l'intérêt de prendre en compte des savoirs locaux dans l'interprétation de ces données, tout au moins pour donner une représentation proche de celles des acteurs locaux.

### 1.1 Le 'mirage' des signatures spectrales dans le domaine optique

Dans les années 80, les signatures spectrales dans les domaines du visible et du proche infra-rouge du spectre électromagnétique concentraient une bonne partie des recherches. Nous étions alors dans l'actualité des premiers satellites d'observation de la terre, Landsat4 puis Spot1 (1986). C'était l'époque où le traitement physique du signal de ces satellites promettait une nouvelle vision de la terre et où nous cherchions à relier le signal télédétekté par les capteurs satellitaires à la réalité des surfaces observées sur le globe.

Nous nous équipions alors de radiomètres portables (les radiomètres Cimel) pour obtenir sur le terrain ce que nous pensions être les clés de l'interprétation du signal : les signatures spectrales de chaque surface terrestre, en particulier de chaque type de végétation. Je ne résiste pas ici au rappel de quelques bases physiques qui fondaient ces espoirs.



### Spectre électromagnétique

Les rayonnements mesurés par les capteurs peuvent être quantifiés sur le spectre des énergies électromagnétiques, classées en fonction de leur fréquence et de leur longueur d'onde électromagnétique. Le visible et le proche-infrarouge ne constituent qu'une très petite partie du spectre (Fig. 2).

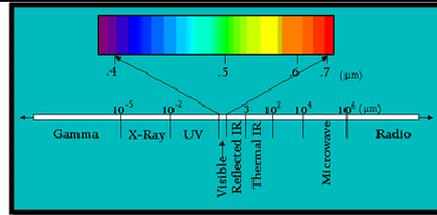


Figure 2. Spectre électromagnétique (source : CCRS/CCT).

### Spectre du rayonnement solaire

Dans le domaine optique, le soleil est la source du rayonnement. Au dessus de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme émis par un corps noir à la température de 5900 °K, avec un maximum de radiation à 0,500 μm. Ce rayonnement solaire, après passage au travers de l'atmosphère, est sensiblement transformé et il varie dans une gamme de 0.25 μm à 3 μm (Fig. 3).

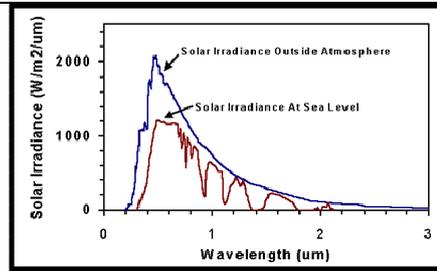


Figure 3. Spectre du rayonnement solaire au dessus de l'atmosphère et de la mer (source : CRISP).

### Rayonnement solaire réfléchi par une cible

Le rayonnement solaire incident sur une cible quelconque se décompose ainsi (Fig. 4) :

- rayonnement réfléchi par la cible ;
- rayonnement absorbé par la cible ;
- et rayonnement transmis par la cible.

Les cibles réfléchissent et absorbent ce rayonnement solaire différemment aux différentes longueurs d'ondes et se différencient théoriquement par leurs réflectances spectrales.

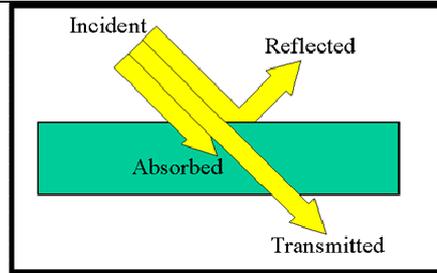


Figure 4. Exemple de rayonnement réfléchi, absorbé et transmis par une cible (source : CCRS/CCT).

### Réflectance spectrale

La réflectance spectrale est la part du rayonnement incident qui est réfléchi par la cible. Cette réflectance varie en fonction de la longueur d'onde et des caractéristiques de la cible (Fig. 5). Ainsi deux cibles peuvent avoir une même réflectance dans une longueur d'onde, mais une réflectance différente dans une autre longueur d'onde. Cette propriété permet théoriquement de différencier les cibles par leurs signatures spectrales.

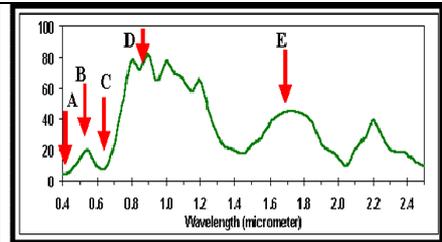


Figure 5. Exemple de spectre de réflectance de la végétation dans le domaine optique. A: bande bleue; B: bande verte; C: bande rouge; D: bande proche IR; E: bande moyen IR proche (source : CRISP).

### Signature spectrale

Différentes cibles absorbent ou réfléchissent différemment le rayonnement solaire à différentes longueurs d'onde. Le spectre des réflectances est donc une signature qui devrait permettre d'identifier cette cible (Fig. 6). La télédétection dans le domaine optique consiste donc à retrouver les objets de la surface à partir des réflectances (radiométries) de l'image.

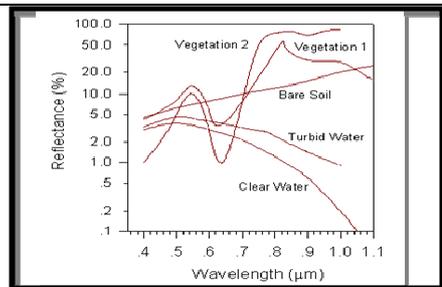


Figure 6. Exemple de signatures spectrales de deux types de végétation, d'une eau claire et d'une eau turbide, et d'un sol nu (source : CRISP).

### Les difficultés liées aux signatures spectrales

Ces bases physiques du bilan radiatif sont séduisantes pour des chercheurs qui découvrent la télédétection spatiale, et elles ont laissé espérer pendant de nombreuses années un important potentiel d'applications, même sur les espaces ruraux des pays du Sud qui nous intéressaient. Toutefois, les travaux menés dans ces régions ont rapidement montré une grande sensibilité des réflectances mesurées par les capteurs satellitaires dans le domaine optique à des paramètres de la surface dont la variabilité naturelle pouvait être importante et « bruite » fortement le signal enregistré. Ceci était d'autant plus vrai dans les pays du Sud que les espaces y sont le plus souvent faiblement anthropisés, la variabilité naturelle est importante et les objets recherchés (les parcelles cultivées, par exemple) sont peu contrastés par rapport à leur environnement. Ces paramètres de surface sont les suivants.

- *L'humidité de la surface, du sol et/ou de la végétation.* Elle a un effet important sur la réflectance mesurée tant dans le domaine visible que dans le proche infrarouge, et une même culture peut avoir des signatures

spectrales très différentes selon son niveau d'humidité (Fig. 7 et 8). Or dans de nombreux pays du Sud, l'agriculture est fortement dépendante de régimes pluviométriques erratiques dont la distribution spatiale peut être très hétérogène.

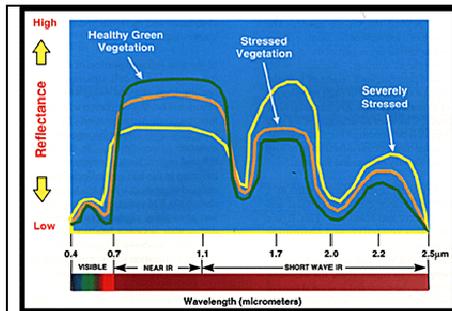


Figure 7. Réflectances d'un type de végétation selon différents niveaux de stress hydrique (source : RST)



Figure 8. Parcelles humides et sèches sur un périmètre rizicole à Ségou au Mali (source : Google Earth).

- *La densité de couvert végétal.* Dans les systèmes de culture extensifs des pays du Sud comme c'est le cas par exemple en Afrique sub-saharienne, la densité du couvert d'une même culture peut être très différente d'une parcelle à l'autre et au sein d'une même parcelle. Lorsque la végétation est peu couvrante, comme c'est souvent le cas, l'effet du sol sur le signal peut devenir prépondérant sur l'effet de la végétation (Fig. 9 et 10) et le signal rend compte alors de la variabilité des sols plus que de la couverture végétale.



Figure 9. Champs de mil autour d'un village au Niger vus par le satellite Ikonos (source : Google Earth).



Figure 10. Champs de mil au Niger vus d'avion en visée latérale (source : Begue A., Cirad).

- *La géométrie du couvert végétal.* En zone tropicale, et plus particulièrement en zone tropicale sèche où la végétation ne recouvre pas totalement le sol et la couverture est hétérogène, les effets directionnels dans les réflectances mesurées peuvent être très importants (Fig. 11 et 12). Dans ce cas, la géométrie du couvert végétal: hauteur, port foliaire, rang, peut avoir une forte influence sur le signal.

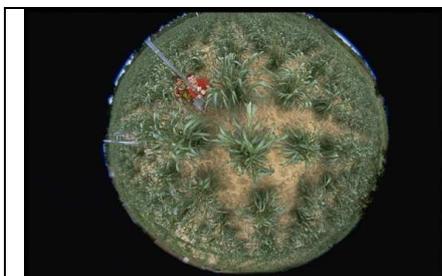


Figure 11. Photo hémisphérique au dessus d'un champ de mil au Niger (source : Cirad).



Figure 12. Semis en ligne de soja au Brésil (source : Cirad).

- *La géométrie de la visée, de l'éclairement et du relief.* Dans les zones à fort relief, outre les effets de parallaxes engendrés par le relief qui nécessitent des corrections géométriques, la réflectance enregistrée par le capteur est fortement dépendante à la fois de la position du soleil et du capteur, et de la position topographique de la cible. Une même couverture végétale sur deux versants opposés d'un même relief aura des réflectances très différentes (Fig. 13 et 14), laissant croire à des objets différents.

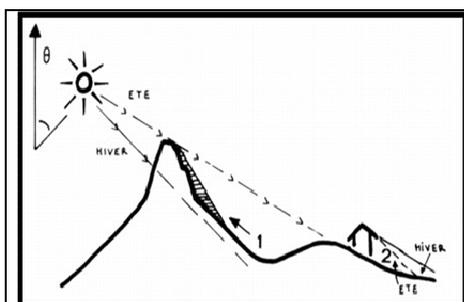


Figure 13. Ombre propre (1) et ombre portée (2) en terrain accidenté avec un éclairage solaire direct (source : Dedieu, 1989)<sup>1</sup>.



Figure 14. Reliefs et ombres dans la région montagneuse de Lacandona au Chiapas (Mexique) sur une image Spot5 (source : Imbernon, Cirad).

- *L'atmosphère*<sup>2</sup>. Au cours des deux trajets effectués par le rayonnement solaire à travers l'atmosphère, descendant du Soleil vers la surface et montant de la surface vers le capteur, l'atmosphère a des effets sur le rayonnement. Ces effets atmosphériques résultent de deux processus, l'absorption et la diffusion, qui sont exercés par les deux constituants de l'atmosphère que la vapeur d'eau et les aérosols (formés des particules, liquides ou solides, en suspension dans l'atmosphère). La concentration en molécules ou particules diffusantes est mesurée par « l'épaisseur optique » de l'atmosphère, une grandeur qui dépend à la fois de la

<sup>1</sup> Dedieu J.P., 1989. *Téledétection et montagne. Un outil privilégié pour l'étude des milieux d'altitude.* Revue de géographie Alpine, vol. 77, n°77-1-3, p. 105-123.

<sup>2</sup> Kergomard C., 2000. *Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC.* Cybergeo, Actes des Journées de Télédétection en Sciences humaines. URL : <http://www.cybergeo.eu/index1679.html>.

longueur du trajet atmosphérique et de la concentration vapeur d'eau et aérosols diffusants. Les angles jouent un rôle important dans ces effets atmosphériques : élévation solaire (mesurée par rapport à l'horizon) et son complémentaire l'angle zénithal solaire (Fig. 15).

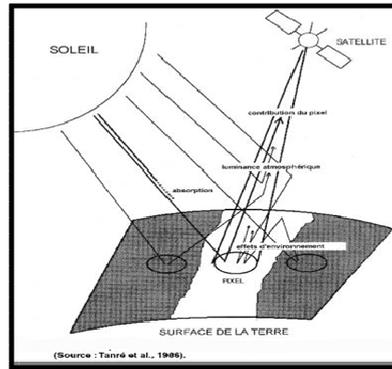


Figure 15. Le trajet atmosphérique du rayonnement solaire et les effets de l'atmosphère.

Les effets atmosphériques sur le signal enregistré par les capteurs satellitaires peuvent être corrigés par le modèle 6S développé initialement par le Laboratoire d'optique atmosphérique de Lille (Cnrs). Mais l'utilisation de ce modèle de correction est une étape complexe du traitement des images et elle requiert des données atmosphériques qui ne sont pas toujours facilement accessibles. De plus, ces corrections atmosphériques restent partielles et elles sont inopérantes lorsque les effets de l'atmosphère sont trop importants.

Tous ces facteurs influencent donc très sensiblement le signal enregistré par le capteur satellitaire dans le domaine optique et ils génèrent une grande variabilité dans le temps et dans l'espace des réponses spectrales d'un même objet. Ils limitent donc considérablement l'utilisation de « signatures spectrales » pour différencier les types de couverture végétale à la surface de la terre.

Sans doute des progrès techniques ont été réalisés dans la qualité des capteurs satellitaires, tant en géométrie qu'en radiométrie, et dans les modèles de correction du signal (modèles de transferts radiatifs, modèles de corrections atmosphériques). Force est de constater toutefois que les résultats restent peu opérationnels au regard du gain de qualité obtenu et de la lourdeur de mise en œuvre de ces outils et méthodes. Sans réfuter l'intérêt que représente la physique du signal en télédétection spatiale, c'est bien la « vérité » de ce signal vis-à-vis du terrain et des objets d'étude que sont l'agriculture, le paysage ou le territoire qui est questionable pour les pays du Sud. Et sans remettre en cause tout l'intérêt de ces données dans la caractérisation des espaces et des processus à la surface de la terre, même pour les pays du Sud, c'est l'approche basée sur le « tout numérique » où l'utilisateur se retranche derrière la « vérité » de la physique du signal en n'étant qu'un « presse bouton » de logiciels plus ou moins sophistiqués, que j'ai tendance à remettre en cause.

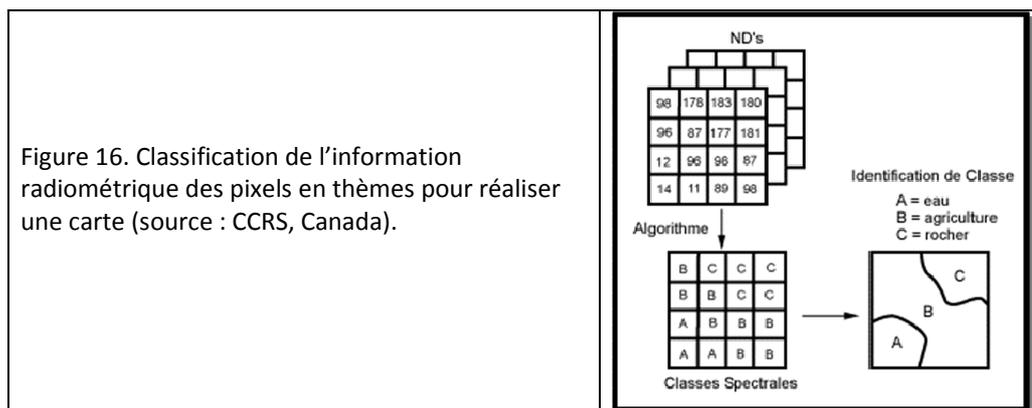
Car, face aux difficultés liées aux signatures spectrales des cibles, il y a également des désillusions du côté des méthodes de classification des images satellitaires pour produire des cartes. Nombre de cartes produites « automatiquement », sans un sérieux travail de vérification sur le terrain, ont parfois donné dans les pays du

Sud des résultats très éloignés de la réalité du terrain et ont discrédité les capacités de la télédétection spatiale.

## 1.2 Les promesses des méthodes de classification d'images

La classification numérique par ordinateur des images satellitales, utilisant des méthodes statistiques relativement évoluées, promettait dans les années 1980 de renouveler la cartographie par une approche technique, normative et reproductible. La photo-interprétation de nos aînés était devenue « ringarde ».

Le principe général de la classification numérique d'une image est basé sur l'utilisation de l'information contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales du capteur pour classer chaque pixel de l'image et lui assigner un thème : par exemple eau, forêt de conifères, maïs ou blé. La « nouvelle » image qui résulte la classification est ainsi composée d'une mosaïque de pixels qui appartiennent chacun à un thème particulier et cette image classée est alors une représentation thématique de l'image numérique originale<sup>3</sup> (Fig. 16)



Une des méthodes les plus simples à utiliser pour classer ces images est le seuillage. Sur des images monospectrales (1 bande), en définissant une valeur minimum et une valeur maximum, on peut représenter aisément ce seuillage sur un histogramme et faire varier les valeurs de seuillage de manière interactive. (Fig. 17).

<sup>3</sup> Centre canadien de télédétection. Tutoriel: Notions fondamentales de télédétection. Analyse et interprétation d'images. URL : [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter4/07\\_f.php](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter4/07_f.php)



De la même manière, il est possible de seuiller une image multispectrale sur des diagrammes de dispersion où les canaux sont visualisés deux à deux. Dans l'exemple suivant (Fig. 18), sur les canaux 2, 3 et 4 de Landsat-TM, l'échelle de couleur est proportionnelle au nombre de pixels de l'image et le point repéré par une étoile correspond au pixel de valeur 21 dans le canal 3, 23 dans le canal 2 et 84 dans le canal 4.

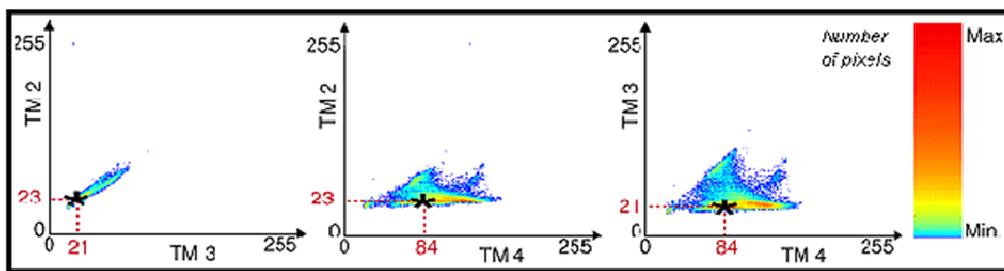


Figure 18. Histogrammes bidimensionnels sur les canaux 2, 3 et 4 de Landsat.

En définissant une valeur minimum et maximum dans chacune des trois bandes, l'utilisateur définit un parallélépipède dans le nuage de points qui permet de classer aisément l'image (Fig. 19).

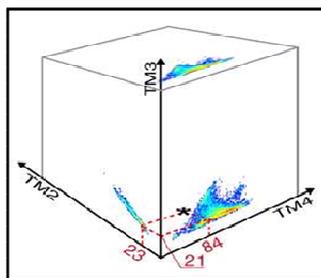


Figure 19. Seuillage sur un histogramme tridimensionnel des canaux 2, 3 et 4 de Landsat.

Cette méthode très simple n'est le plus souvent utilisée que pour réaliser des masques sur l'image (eau, nuages ou bâti). Mais la méthode la plus utilisée, et la plus proche du terrain, a été la classification supervisée. Par cette méthode, l'utilisateur identifie sur le terrain des échantillons homogènes de l'image, représentatifs des différents thèmes à classer. Ces échantillons serviront de données-tests pour la classification de l'ensemble de l'image. L'utilisateur détermine la « signature spectrale » de chacune des classes à partir de ces échantillons, et il classe les pixels de l'image avec ces signatures. L'une des méthodes les plus utilisées pour affecter les pixels à la classe la plus probable a été celle du maximum de vraisemblance qui définit des aires d'égalité de probabilité autour des centres de gravité des classes. Pour chaque pixel, les probabilités d'appartenir à chacune des classes sont calculées puis chaque pixel est affecté à la classe dont la probabilité est la plus forte. Cette méthode a été très largement utilisée dans les années 1980 et 1990.

Plus récemment, les méthodes « orientées-objets » ont fait leur apparition et elles ont apporté des améliorations à la classification des images satellitaires, en particulier des images à Très Haute Résolution spatiale (THR). Ces méthodes ne tiennent pas seulement compte des propriétés spectrales des objets mais aussi de leurs organisations et de leurs relations spatiales, et de leur contexte géographique. Cela permet de réduire la probabilité de confusion entre les classes. Ces méthodes s'organisent en deux grandes étapes (Fig. 20) :

- la segmentation de l'image qui est une subdivision de l'image selon des critères spectraux et spatiaux en régions homogènes représentatives des objets du territoire ;
- la classification qui comporte l'analyse des propriétés des segments, la définition des critères discriminants et des règles de classification.

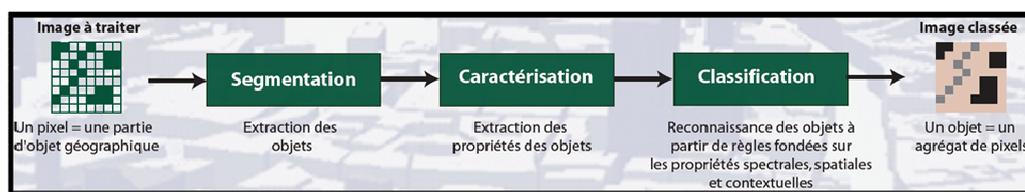


Figure 20. La classification d'image orientée-objet (source : Boussaid, 2006)<sup>4</sup>.

### ***Les difficultés liées aux classifications d'images***

Au regard de mon expérience dans le domaine de la télédétection spatiale, les difficultés liées à la classification d'images satellitaires restent de deux ordres :

- la complexité de la réalité du terrain (hétérogénéité, présence de pixels mixtes, grand nombre d'objets par unité de surface....) et la difficulté à rendre compte de cette complexité par le traitement informatique de l'image, quel que soit le logiciel ;
- la trop grande confiance donnée aux traitements informatiques, le peu de valorisation des savoirs-locaux et la faiblesse de la confrontation à la réalité du terrain et à ses acteurs.

Ce dernier point sera traité plus avant. Je ne reprendrai ici que les problèmes liés aux pixels mixtes et à la grande hétérogénéité des paysages agricoles des pays du Sud.

<sup>4</sup> URL : [http://sheeren.free.fr/Poster\\_Sageo06\\_Boussaid\\_et\\_al.pdf](http://sheeren.free.fr/Poster_Sageo06_Boussaid_et_al.pdf)

- Le problème des pixels mixtes

Les « pixels mixtes » sont des pixels composés de plusieurs objets dont la dimension est inférieure à la résolution du capteur. Ces pixels intègrent donc la radiométrie des différents objets présents dans le pixel. Lors de la prise de vue, si un pixel individuel est situé complètement dans les limites d'une classe (un objet), alors les valeurs de ce pixel seront déterminées par les propriétés spectrales de cette classe : on dit que c'est un pixel pur. Mais il est plus probable que le pixel recouvre plusieurs classes et la réponse spectrale résultante est alors un « mélange » de réponses spectrales de chaque objet (Fig. 21 et 22) : ces pixels mixtes sont donc difficilement classables. Or, dans les pays du Sud, l'agriculture familiale est largement prépondérante et les parcelles de culture sont de taille réduite, le plus souvent inférieures à un hectare, parfois de l'ordre de quelques centaines de m<sup>2</sup>. Dans ce cas, avec des résolutions spatiales des capteurs de l'ordre de 10, 20 ou 30 m, les pixels mixtes sont très nombreux sur des images des satellites Spot3 ou Landsat TM.

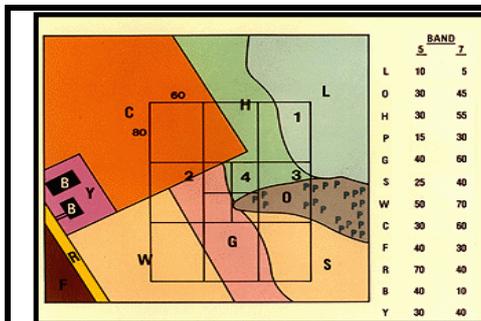


Figure 21. Exemple de pixels mixtes sur un parcellaire (source : NASA).

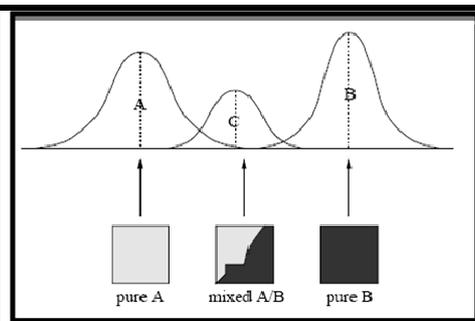


Figure 22. Confusion spectrale liée au « mélange » de classes (source : Campbell)<sup>5</sup>

Des méthodes mathématiques ont été développées pour traiter les pixels mixtes par la résolution de systèmes d'inconnues<sup>6</sup> : c'est le cas en particulier entre des images Noaa-Avhrr et Spot (Fig. 23). Mais ces méthodes sont complexes et coûteuses (fusion d'images de résolutions différentes), et les incertitudes statistiques demeurent importantes.

L'apparition de capteurs à Très haute résolution (THR) spatiale avec une résolution métrique et submétrique a réduit ce problème des pixels mixtes omniprésent sur les images Noaa-Avhrr, comme sur l'image ci-dessous au Niger qui est comparée à une image Spot1 (Fig. 24).

<sup>5</sup> Campbell J.B., 2002. *Introduction to remote sensing*. Third Edition. Taylor & Francis, London. 626 p.

<sup>6</sup> Ouaidrari H., Bégué A., Imbemon J., D'Herbès J.M. 1996. *Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels. Application to the HAPEX-Sahel degree square*. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n°12. p. 2259-2280.

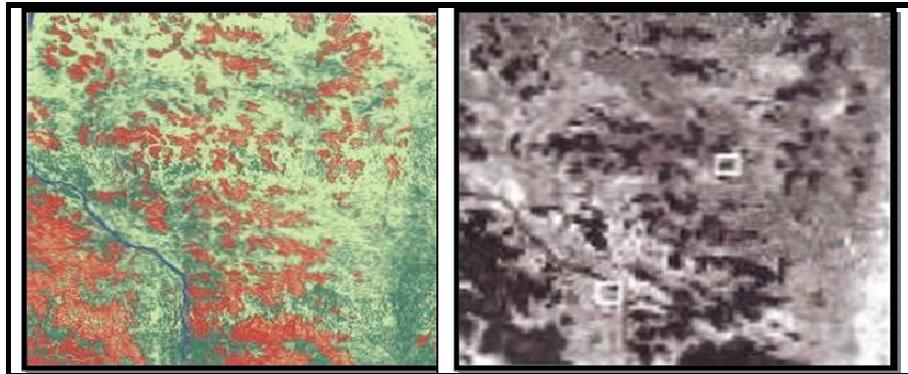


Figure 23. Comparaison d'une image Spot à 20 m de résolution (en vert, culture de mil ; en rouge, brousse tigrée) et d'une image Noaa-Avhr à 1 km de résolution (source : Ouaidrari et al.).



Figure 24. Différence de perception du terrain avec deux images juxtaposées : Spot4 XS à 20m de résolution et Ikonos à 1m de résolution (source : Imbernon, Cirad).

Mais si en général la proportion de pixels mixtes décroît lorsque la résolution spatiale devient plus fine, dans certains cas cette proportion peut augmenter avec l'apparition de nouveaux objets de plus petite taille et de nouvelles classes spectrales. Par exemple l'image d'une région forestière, qui peut paraître homogène à faible résolution, fera apparaître à Très Haute Résolution des arbres individualisés de différentes espèces, et des espaces « ouverts » intermédiaires. De plus, les différences locales d'humidité, hauteur ou éclaircissement deviennent plus apparentes et elles complexifient, et peuvent même dégrader, les classifications d'image<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Justice, C.O., B.L. Markham, J.R.G. Townshend, and R.L. Kennard, 1989. *Spatial degradation of satellite data*. International Journal of Remote Sensing, vol. 10. p. 1539-1561.

- Le nombre considérable d'objets géographiques hétérogènes dans un espace rural

L'accès à des images à très haute résolution spatiale comme Ikonos, QuickBird ou même Spot5 a considérablement augmenté la capacité de discrimination des objets présents à la surface de la terre. Le corollaire est une surabondance d'informations dans l'image qu'il devient difficile de classer pour en faire une représentation cartographique. Dans le cas du projet Sinrem en Amérique centrale (Photos 1 et 2), aucune méthode de classification ne nous a donné de résultats satisfaisants ; même les méthodes orientées-objet sont restées inefficaces. En Guinée forestière, sur le projet UN-HCR, la même difficulté a été rencontrée avec des images à très haute résolution à 1 m de résolution (Ikonos pan-sharpened) (Fig. 25). Ces images n'ont été utilisées qu'en photo-interprétation et que pour la reconnaissance automatique d'objets par le logiciel Adoc que nous avons développé (voir plus avant).

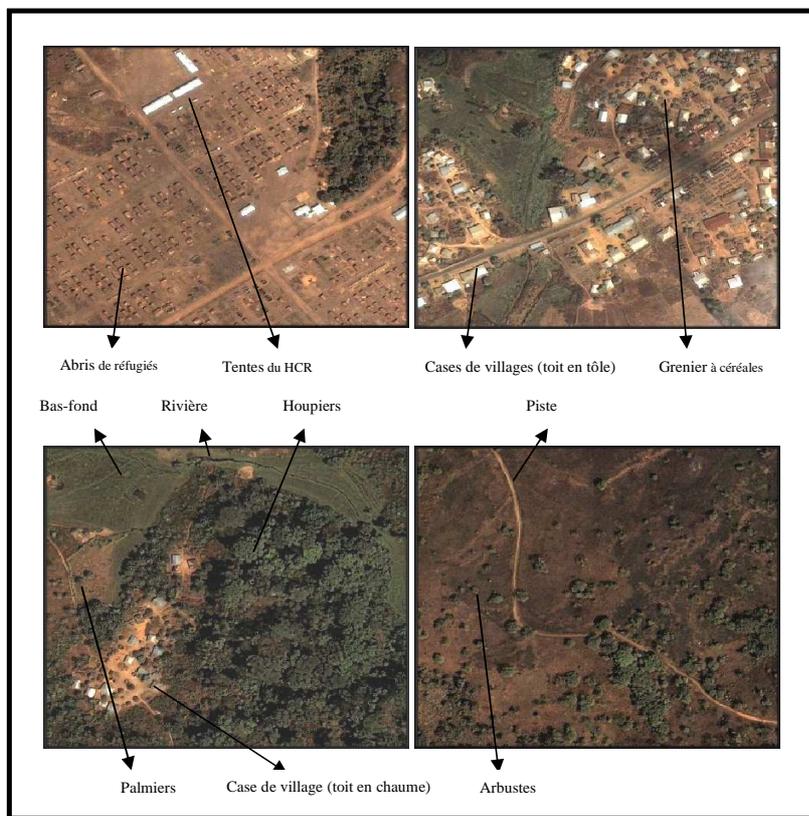
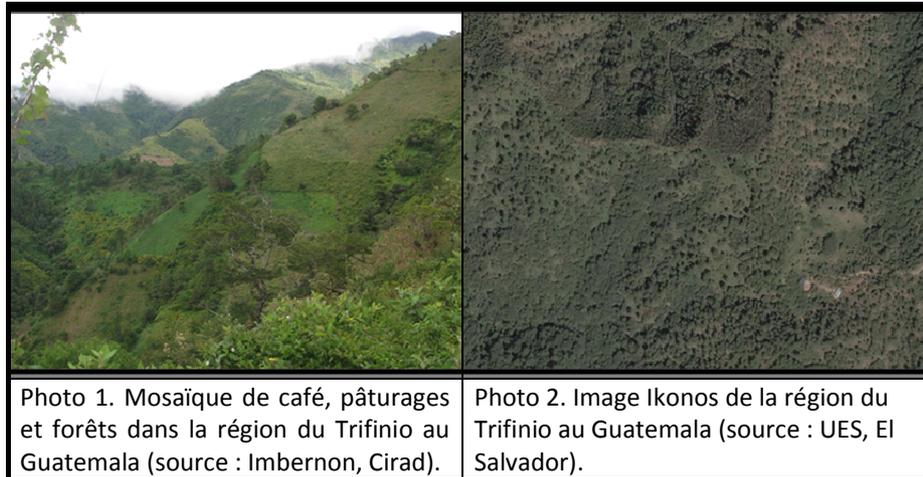


Figure 25. Détails d'images Ikonos pan-sharpened de Guinée forestière (source: Imbernon, Cirad).



### 1.3 L'élargissement du spectre électromagnétique à l'infrarouge thermique et aux micro-ondes

Depuis les années 1980, l'offre en images satellitaires s'est incroyablement diversifiée. Dans un premier temps, le spectre électromagnétique des capteurs s'est élargi avec un accès à des images dans des domaines spectraux de plus en plus éloignés comme l'Infrarouge thermique (IRT) et les micro-ondes.

#### *Les données dans l'infrarouge thermique*

Si le visible et le proche IR correspondent au rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres et donnent une image proche de la vision humaine, l'IRT correspond au rayonnement terrestre émis vers l'atmosphère (rayonnement tellurique) et il n'est lié qu'à la température radiative de la surface terrestre. Sa mesure permet donc de s'affranchir du rayonnement solaire et d'avoir accès à des images de jour comme de nuit.

Dans mes premiers travaux de recherches, j'ai utilisé les canaux IRT des satellites Météosat et Noaa-Avhr pour estimer les précipitations ou l'évapotranspiration des couverts (le flux de chaleur latente) en zone sahélienne (Fig. 26 et 27). Ces travaux de recherches collectifs<sup>8</sup> ont été récompensés en 1991 par le prix Brochet-Gerbier, décerné par l'Organisation météorologique mondiale des Nations-Unies à Genève (OMM).

<sup>8</sup> Seguin B., Assad E., Freteaud J.P., Imbernon J., Kerr Y., Lagouarde J.P., 1989. *Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions.* Int. J. Remote Sensing, vol. 10, n° 6, p. 1101-1117.

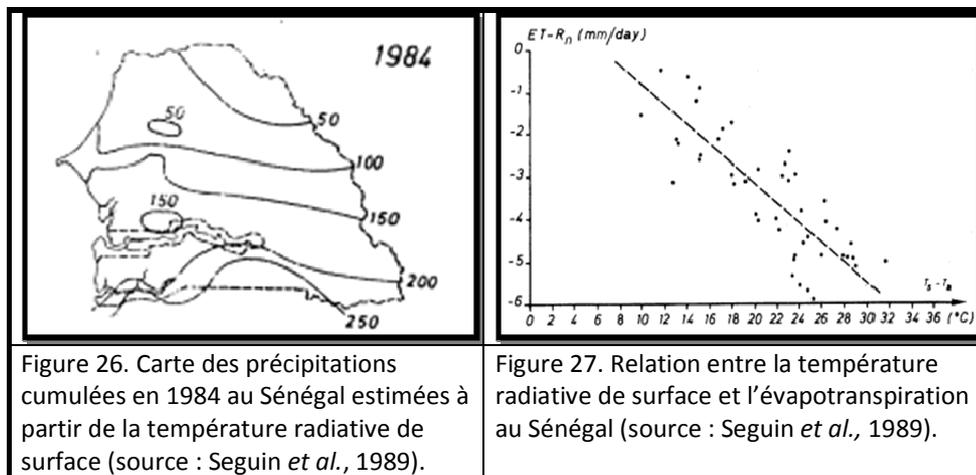


Figure 26. Carte des précipitations cumulées en 1984 au Sénégal estimées à partir de la température radiative de surface (source : Seguin *et al.*, 1989).

Figure 27. Relation entre la température radiative de surface et l'évapotranspiration au Sénégal (source : Seguin *et al.*, 1989).

### Les faiblesses des images IRT

Malgré tout l'intérêt que représentait cette nouvelle vision de la surface terrestre dans l'Infrarouge thermique, l'interprétation de la température de surface est restée difficile pour plusieurs raisons.

- La mesure de la température de la végétation ne peut se faire indépendamment de celle du sol, et le degré d'interférence du sol dans le signal est fonction de la structure du couvert et de la configuration des angles entre le soleil et le capteur. De fait, dans les pays du Sud, dans la mesure où le recouvrement du sol par la végétation est faible, l'influence du type de sol peut être très importante sur la température radiative de surface mesurée.
- La traduction théorique de la Température radiative de surface  $T_s$  (une fois la calibration du capteur réalisée) en termes de transpiration des plantes repose sur des échanges complexes de chaleur au sein du système sol – végétation – atmosphère. Cette complexité est difficile à prendre en compte et à représenter dans les approches de modélisation.
- La correction des effets atmosphériques sur la température radiative de surface enregistrée par le capteur nécessite des modèles relativement sophistiqués (à l'époque, il s'agissait du modèle Lowtran) et des jeux de données difficilement accessibles sur les profils atmosphériques, en termes de contenu en vapeur d'eau, de température et de pression.
- Enfin, la résolution spatiale des capteurs thermiques embarqués est moins bonne que dans le domaine visible du fait des contraintes d'antenne. Lorsque nous avons des résolutions de l'ordre de 10 m dans le domaine optique, la résolution dans l'IR thermique est encore de 100 m et avec une telle résolution la question des pixels mixtes reste cruciale. A l'heure actuelle, ce ratio de résolution entre domaines optique et thermique perdure, mais les résolutions sont respectivement de l'ordre de 1m et de 10m, ce qui ouvre des perspectives d'application plus précises pour l'Infrarouge thermique.

### **Les données de radar (micro-ondes actives)**

Au-delà encore du domaine de l'IRT se trouvent les micro-ondes des radars. Les 'images radar' relèvent de ce qu'il est convenu d'appeler la télédétection active puisque le rayonnement est d'abord émis par l'instrument

embarqué à bord du satellite avant l'enregistrement de la partie du signal retournée vers le capteur. Il ne s'agit donc plus comme pour les domaines précédents du seul enregistrement d'un rayonnement extérieur émis par le soleil ou la terre. Cette spécificité du radar, associée à la transparence de l'atmosphère dans ces longueurs d'onde, présente l'avantage sur les précédents domaines spectraux de permettre l'acquisition de données de jour comme de nuit et par temps couvert (ce qui en région tropicale humide peut présenter un intérêt important).

Lorsque les satellites ERS (1 et 2) et JERS, puis RADARSAT, sont devenus disponibles, de nombreuses applications ont été explorées dans le domaine de l'agriculture et de la forêt. Pour la plupart, ces applications n'ont pas atteint le stade opérationnel, tout au moins dans les pays du Sud. Mon expérience dans ce domaine est très faible, car je n'ai utilisé des images ERS et JERS que sur le projet 'Alternatives to Slash and Burn', en Amazonie brésilienne et au Cameroun (Fig. 28 et 29). Malgré une série de traitements à l'aide de filtres relativement complexes, au final ces images n'ont pas apporté d'information nouvelle pour le projet. Si elles s'affranchissaient effectivement de la nébulosité présente sur ces zones tropicales humides, elles n'ont pas permis de différencier les types de couvert végétal, pas même dans certains cas de différencier tout simplement les forêts de zones déforestées.

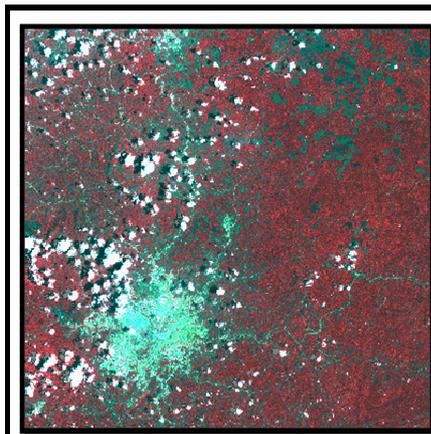


Figure 28. Image Spot4 XS de mars 1995 sur Yaoundé au Cameroun (source : Imbernon, Cirad).

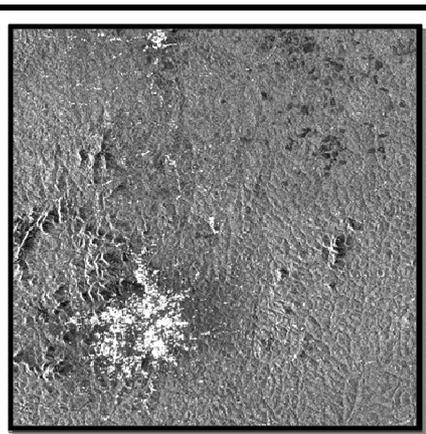


Figure 29. Image ERS-SAR d'avril 1996 sur Yaoundé au Cameroun (source : Imbernon, Cirad).

### Les faiblesses des images radar

Si ces images ont l'immense intérêt de fournir des données quelles que soient les conditions météorologiques, elles ont des limites liées à la géométrie et à la radiométrie. Ainsi sur les zones de relief, la morphologie des reliefs induit des distorsions géométriques particulières dans les images radar (« déplacement topographique »). De plus l'interférence aléatoire des ondes électromagnétiques crée sur l'image une texture granulaire particulière : ce phénomène est appelé « chatolement » (*Speckle*). Des techniques de filtrage des images radar ont été développées pour réduire le *Speckle*. Mais même si des progrès considérables ont été accomplis, l'interprétation de ces images radar reste difficile et les nombreux traitements nécessaires (en particulier les filtrages) sont peu accessibles à l'utilisateur commun.

#### 1.4 L'apparition de la très haute résolution spatiale<sup>9</sup>

Depuis le lancement des premiers satellites d'observation de la terre dans les années 1970, les progrès techniques ont été continus. Mais les années 2000 constituent à mon sens une révolution technologique dans l'observation de la terre avec le lancement de satellites à résolution métrique ou submétrique (Fig. 30) qui nous offrent une vision proche de la perception que nous pouvons avoir au sol.

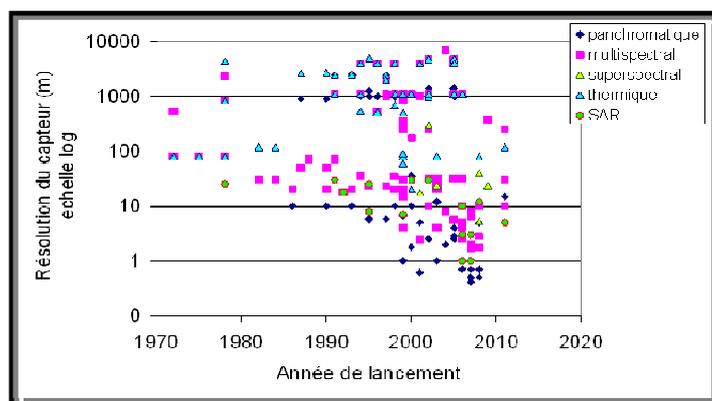


Figure 30. Evolution de la résolution spatiale des capteurs satellitaires d'observation de la terre depuis l'origine (source : Umr Tetis).

Les satellites Spot 5 (Spot-Image, France), Alos (Nasda, Japon), Ikonos (Space Imaging, États- Unis), Quickbird (DigitalGlobe, États-Unis) fournissent maintenant des images dont la résolution spatiale se situe entre 0,6 m et 2,5 m. Et cette abondance de l'offre est apparue dans un laps de temps très court puisque les premiers capteurs à très haute résolution disponibles dans le domaine civil datent du début des années 2000.

L'amélioration de la résolution spatiale, et donc de la perception des composantes du paysage, nous permet de visualiser et d'analyser des objets jamais vus auparavant en télédétection : petit réseau d'irrigation, greniers à grains, arbres isolés... Ces nouvelles images mettent en avant la notion d'objets. Et ces objets peuvent être caractérisés par leur forme et leur texture, et non plus uniquement par leur radiométrie spectrale. Ainsi, de nouvelles textures apparaissent comme des sillons dans un champ ou des arbres dans un verger ; et ces textures peuvent cohabiter à plusieurs échelles spatiales.

Avec l'accès à ces images, les applications nouvelles sont nombreuses :

- Etude de l'intra-urbain. A basse et moyenne résolution, l'information concernant l'urbain se réduisait essentiellement à une différenciation binaire entre l'urbain et le non-urbain. A très haute résolution, les différents types de tissu urbain peuvent être distingués en fonction de la densité et du type de bâti.

<sup>9</sup> Conclusions du groupe «2D». Groupe de travail «Méthodologie ORFEO». CNES 23/07/2004. URL : [http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/PDF/Synthese\\_2D.pdf](http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/PDF/Synthese_2D.pdf).

- Extraction de nouveaux items cartographiques. La très haute résolution permet d'enrichir les items cartographiques que l'on peut extraire des images, et d'accroître le détail et la précision des nomenclatures cartographiques qui étaient utilisées pour les images à moyenne résolution.
- Comptage et classification d'objets individualisés. Avec cette capacité à distinguer les objets, il est possible de faire des comptages, comme des comptages d'arbres dans un espace. Ceci ouvre la porte à de nouvelles applications pour l'étude de la biodiversité ou des milieux urbains par exemple.

Pour tirer parti de cette très haute résolution, de nouvelles méthodes de traitement d'images ont été développées. Elles concernent principalement :

- la prise en compte de la texture dans les algorithmes de classification et de segmentation. Pour associer différents modes de l'histogramme à même classe, des hypothèses contextuelles ou sur les matrices de co-occurrence sont maintenant proposées.
- la prise en compte de la géométrie des objets et des relations entre les objets. Des approches utilisées dans le domaine de l'analyse d'image peuvent être utilisées : approches stochastiques, approches variationnelles, morphologie mathématique... C'est sans doute l'aspect le plus novateur dans le traitement de ces données. Les variables traitées ne sont plus les pixels, mais des objets, c'est à dire des ensembles connexes de pixels ayant une structure géométrique.

#### Les contraintes de l'imagerie à très haute résolution

Si ces images renouvellent notre perception de la surface terrestre, il n'en demeure pas moins qu'elles représentent des contraintes :

- le volume des fichiers à manipuler ne se compte plus en mégaoctets, mais en gigaoctets, et cela nécessite des moyens de calcul et de stockage très importants ;
- la surface couverte par ces images est de plus en plus réduite ; la taille d'une scène acquise par un capteur est passée par exemple de 185 km x 185 km pour Landsat-TM à 11 km x 11 km pour Ikonos (Fig. 31) ; l'utilisation de ces images THR ne peut donc s'envisager que pour des applications locales et la vision régionale n'est plus possible avec une seule image ;

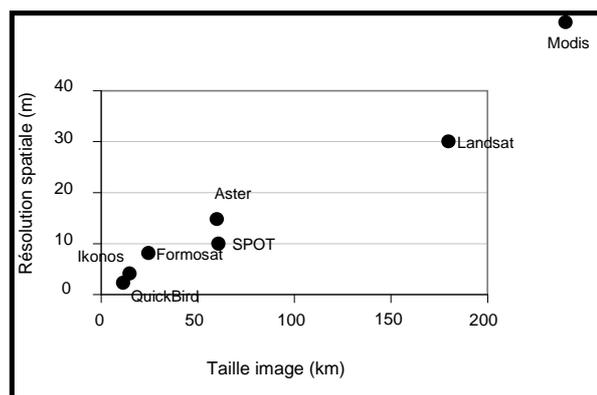


Figure 31. Couverture spatiale des différents capteurs satellitaires (source : Umr Tetis).

– coût du km<sup>2</sup> couvert par ces images est élevé ; nous sommes passés d'un coût du km<sup>2</sup> qui était négligeable pour les images Landsat-TM à un coût de l'ordre de 15 à 20 euros/km<sup>2</sup> pour les images Ikonos et Quickbird. Un tel investissement se justifie lorsque les intérêts économiques, sociaux ou environnementaux sur l'espace observé sont très importants ; c'est rarement le cas sur les espaces ruraux des pays du Sud où j'interviens. D'une certaine manière la fracture sociale entre pays du Nord et du Sud dans l'utilisation de la télédétection spatiale continue à se creuser<sup>10</sup>.

### **1.5 Vérités et mensonges du traitement des données satellitales. La fonction du terrain**

Dans les années 1980, la télédétection spatiale était présentée par ses détracteurs comme « un ensemble de solutions à la recherche de problèmes ». Les temps ont changé et l'on pourrait dire à présent le contraire, tant les demandes sont nombreuses et les applications diversifiées. Il faut reconnaître que la télédétection spatiale a apporté beaucoup à la connaissance de l'espace géographique et de ses transformations. En géographie rurale, dans les pays du Sud, la télédétection spatiale a été et est toujours un puissant outil pour caractériser des composantes paysagères comme le parcellaire agricole. Par la répétitivité des acquisitions, elle permet aussi les analyses diachroniques et le suivi des processus de déforestation ou d'urbanisation. Elle permet aussi d'analyser des processus spatiaux comme la fragmentation d'un paysage. Tous ces apports sont indéniables et sont à son crédit.

Mais de nombreux échecs dans l'application de la télédétection spatiale existent, et en particulier dans le domaine de l'agriculture dans les pays du Sud. Ces échecs sont peu ou pas visibles, que ce soit dans les revues scientifiques ou sur le Web. Il est quasi-impossible d'en trouver trace, car les chercheurs sont restés très discrets sur les expériences négatives ou tout au moins sur les difficultés rencontrées. Et le lobbying des distributeurs d'images a certainement fortement joué dans ce sens.

Or la concordance entre les informations produites à partir de données satellitales et la réalité du terrain peut être mesurée : biomasse sur pied, occupation des terres... On parle souvent de « vérité terrain », car d'une manière implicite le « terrain » est synonyme de contact direct avec la réalité des choses. « *C'est le lieu où les choses se révèlent à la vue et pour lequel sont utilisés des relevés de terrain, par opposition aux constructions purement théoriques issues du travail en laboratoire* »<sup>11</sup>. Or le spécialiste en télédétection, souvent issu des « sciences physiques », a été formé pour traiter, interpréter et analyser les images de télédétection ; pas pour se confronter à cette réalité du terrain. Son travail consiste d'abord à utiliser des logiciels spécialisés pour traiter les données numériques des capteurs satellitaires.

Or la télédétection spatiale devrait à mon sens être considérée comme un outil complémentaire aux mesures et aux observations sur le terrain. Pour comprendre l'information issue de l'image satellitale, pour développer les méthodes reliant l'image à la réalité ou pour valider l'information que l'on extrait de l'image, il est essentiel de se rendre sur place, d'observer in situ les paysages, de récolter des échantillons, de mesurer le phénomène étudié et de confronter l'information spatiale avec la perception du terrain qu'en ont les acteurs

---

<sup>10</sup> Des initiatives internationales comme "GEO Agricultural Monitoring Community of Practice" ou les missions 'Sentinelle' du programme de Surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité (GMES) visent à rendre plus accessible l'information satellitale aux pays du Sud au travers de réseaux qui se mettent en place. Mais les retombées pour les pays du Sud ne sont pas encore visibles et la gestion de ces réseaux reste du domaine exclusif des pays du Nord.

<sup>11</sup> URL : [http://www.hypergeo.eu/IMG/\\_article\\_PDF/article\\_17.pdf](http://www.hypergeo.eu/IMG/_article_PDF/article_17.pdf)

locaux. Le terrain permet de calibrer et d'interpréter les données de télédétection et de les confronter aux « savoirs locaux ».

L'instantanéité de l'image satellitale à l'écran, la facilité que l'on a de la manipuler, de faire apparaître des objets cachés à l'œil humain, donne une impression de vérité absolue. Cela incite le spécialiste du traitement d'images à interpréter l'image par tous les moyens, multipliant les filtres, les seuils et les traitements statistiques pour faire apparaître justement cette vérité cachée. A tel point qu'il en devient impossible parfois de reconstituer l'historique des multiples traitements réalisés. La technique de traitement numérique prend le dessus. Et en mobilisant des outils et des méthodes sophistiqués, ces traitements numériques donnent une satisfaction intellectuelle. Mais ils en font oublier la complexité du réel sur le terrain.

Les exemples d'échec de cette approche techniciste que j'ai pu constater sont nombreux. Par exemple, deux cartes d'occupation des terres ont été réalisées sur le territoire d'El Salvador, en Amérique centrale, avec les mêmes images Landsat ETM+ de 2002, mais de deux manières différentes (Fig. 32 et 33) : l'une par traitement automatique sur ordinateur depuis le laboratoire de géomatique du Catie<sup>12</sup> au Costa Rica, l'autre par photo-interprétation, avec des observations sur le terrain avec des agents locaux puis une validation par les collectivités et les associations locales (associations de producteurs de café ou ONG environnementaliste). Au final, la carte réalisée par le Catie indique de grandes étendues de forêts là où n'existe sur le terrain aucune forêt comme je l'ai vérifié moi-même. Ces exemples ont fait beaucoup de mal à la télédétection spatiale, en décrédibilisant les données et les méthodes de traitement utilisées.

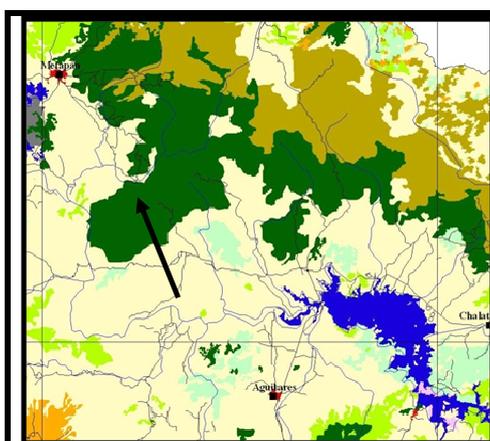


Figure 32. Carte d'occupation des terres dans le Nord d'El Salvador en 2002 réalisée par traitement automatique (source : Catie).

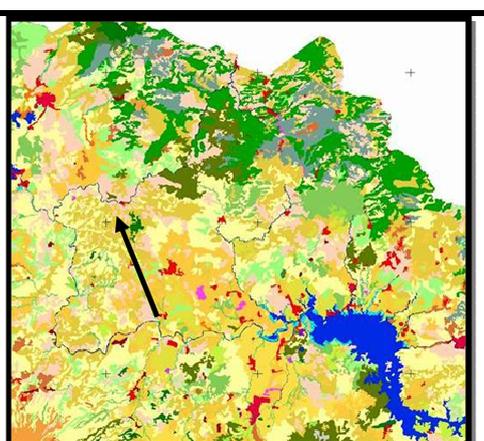


Figure 33. Carte d'occupation des terres dans le nord d'El Salvador en 2002 réalisée par photo-interprétation et avec des savoirs locaux (source : Cirad).

La fonction du terrain est donc primordiale pour apporter du crédit aux informations produites à partir des données satellitales, tout au moins dans le cas des pays du Sud où il est difficile de s'appuyer sur des

<sup>12</sup> Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza. Turrialba, Costa Rica.

informations existantes. Dans ce processus de confrontation de ces informations à la vérité du terrain, la prise en compte des « savoirs locaux » permet de renforcer la légitimité des analyses produites et de mieux prendre en compte la complexité de terrain.

### **1.6 La cartographie participative et l'intégration de savoirs locaux**

Face aux modèles traditionnels de classification numérique d'images satellitaires basés sur des algorithmes informatiques, il est un domaine qui offre des perspectives « illimitées » pour la réalisation de cartes, en particulier dans les pays du Sud ; c'est celui de la prise en compte des savoirs locaux des sociétés qui vivent dans et des espaces étudiés dans une cartographie participative.

La cartographie participative est apparue dans les années 1980 et les acteurs du développement utilisaient à cette époque les méthodes de *Participatory Rural Appraisal* (PRA) mais avec peu ou pas de cartographie. Cette situation a changé dans les années 1990 avec la « démocratisation » des SIG, des GPS et des images satellitaires, et leur utilisation de plus en plus fréquente pour des projets territoriaux.

La cartographie participative consiste à transcrire les savoirs locaux sur des cartes, des photos aériennes ou des images satellitaires. Cette nouvelle approche est fortement inspirée des approches participatives utilisées dans le développement rural et elle se décline de deux manières :

- faire participer les acteurs locaux à une retranscription cartographique de leur perception des ressources naturelles du territoire et de la répartition spatiale ;
- cartographier la perception environnementale des acteurs locaux de ce territoire sous l'angle des atouts (par exemple, les potentialités agricoles des sols), des faiblesses et des contraintes (liées par exemple à la fertilité des sols), des évolutions majeures sur le territoire (déforestation ou reforestation), ou des projets envisagés ou souhaités sur le territoire.

L'expérience de cartographie participative à très haute résolution que j'ai eue en Haïti en 2000 pour le compte de la FAO<sup>13</sup> m'a permis par exemple de cartographier non seulement l'occupation des terres d'un territoire, mais aussi la perception de la fertilité des sols qu'en avaient les populations locales. L'utilisation de dénominations vernaculaires propres aux populations locales a permis à la fois d'enrichir la carte et de faciliter son appropriation par les acteurs locaux eux-mêmes. Par la suite, mes expériences de cartographie de l'occupation des terres ont pour la plupart été réalisées sur le terrain avec l'appui des acteurs locaux : bassin versant du rio Lempa (Guatemala, Honduras et El Salvador), territoire national d'El Salvador, région de Lacandona au Chiapas (Mexique) (photos 3 et 4).

---

<sup>13</sup> Imbernon J., 2002. *Cartographie participative à très haute résolution. Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti*. Revue Internationale de Géomatique, vol. 12, n° 1. p. 115-128.



### Les difficultés dans la cartographie participative

La première des difficultés est l'amateurisme qui prévaut parfois dans la représentation cartographique. Les dessins « naïfs » représentant le territoire ont certes un intérêt pour faire émerger les questionnements, mais ce ne sont en aucun cas des cartes au sens de représentations planes et réduites de la surface dans un rapport de similitude (l'échelle). Et ces « représentations mentales » ne sont pas utilisables pour localiser les ressources, les processus ou les actions à mener.

L'autre problème de ces cartographies participatives est celui de la représentativité de ceux qui participent à la démarche. L'instrumentation de cette démarche par des groupes d'intérêts est toujours possible et le risque de tomber dans le piège du groupe dominant n'est pas négligeable. Il faut être conscient que le résultat de la cartographie participative reste dépendant de la composition du groupe des participants.

La démarche peut aussi révéler voire créer des tensions et des conflits entre les acteurs du terrain (ces conflits sont souvent liés au foncier et à la gestion des ressources naturelles) ou entre les acteurs du terrain et les autorités locales. Ces conflits sont intéressants à mettre en évidence et constituent une source d'information sur les usages et sur les rapports sociaux entre les groupes. Mais ils peuvent polluer la démarche de cartographie participative et la rendre stérile. Le rôle de l'expert pour éviter ces pièges est important. Il assure l'appui technique dans la représentation cartographique, il tient compte des jeux de pouvoir au sein du groupe des participants et des différences de perception, il joue un rôle de facilitateur et il synthétise les connaissances en essayant d'aboutir à des consensus. L'expert ne s'efface donc pas derrière les savoirs locaux : il les fait émerger, il les cristallise et il les représente selon les normes en vigueur en cartographie. Entre l'expert qui sait tout et l'expert qui s'efface devant les savoirs locaux, il faut faire varier le curseur et rechercher le bon équilibre.

## **1.7 L'instrumentalisation de l'analyse spatiale par les SIG**

A la fin des années 1980, les travaux en télédétection spatiale ont fait appel à de nouveaux outils d'intégration de données et d'analyse spatiale : les Systèmes d'information géographique (SIG). La logique sous-jacente à ces systèmes présente un double intérêt :

- l'espace géographique traité y est pris dans toutes ses dimensions : localisation exacte (latitude, longitude), caractères physiques (relief, climat, hydrologie, sols, écosystème), transformations humaines (peuplement, constructions, réseaux de transports, activités agricoles); le SIG est un moyen d'intégrer toutes les dimensions de l'espace ou des processus spatiaux en jeu ;
- le fonctionnement par couches que l'on peut ajouter, enlever ou combiner, permet de vérifier étape par étape chaque hypothèse de l'analyse spatiale. De plus les SIG permettent d'intégrer et de gérer à la fois des données au format vecteur issues de cartes et des données au format *raster* issues des images satellitales.

Au départ, dans les années 1980, les SIG permettaient seulement de générer, mémoriser et visualiser les données géographiques. Ils ont rapidement été enrichis par des fonctions d'analyse spatiale, et leur développement a été très rapide (Fig. 34). Force est de reconnaître qu'à l'heure actuelle l'usage des SIG s'est répandu, que ce soit dans la communauté scientifique (agronomes, forestiers, géologues, urbanistes, historiens...), mais aussi dans les entreprises, les collectivités territoriales et même dans notre vie courante. Ce développement a commencé dans les années 1970 par la cartographie assistée par ordinateur, suivie par la gestion de bases de données 'spatiales', avant d'en arriver à la composante la plus intéressante qui est l'analyse spatiale et plus récemment aux applications multimédias et à la diffusion par le Web.

### *- La cartographie assistée par ordinateur dans les années 1970*

Points, lignes et surfaces qui définissent les objets sur une carte sont représentés en coordonnées X, Y. A cette époque, le plus important sans doute est le passage d'un format analogique (la carte papier) à un format numérique stocké sur des disques durs. Un des avantages de cette cartographie assistée par ordinateur était la capacité de modifier une partie de la carte sans refaire la totalité de la carte et de redessiner rapidement la carte entière mise à jour.

### *- La gestion de bases de données spatiales, dans les années 1980*

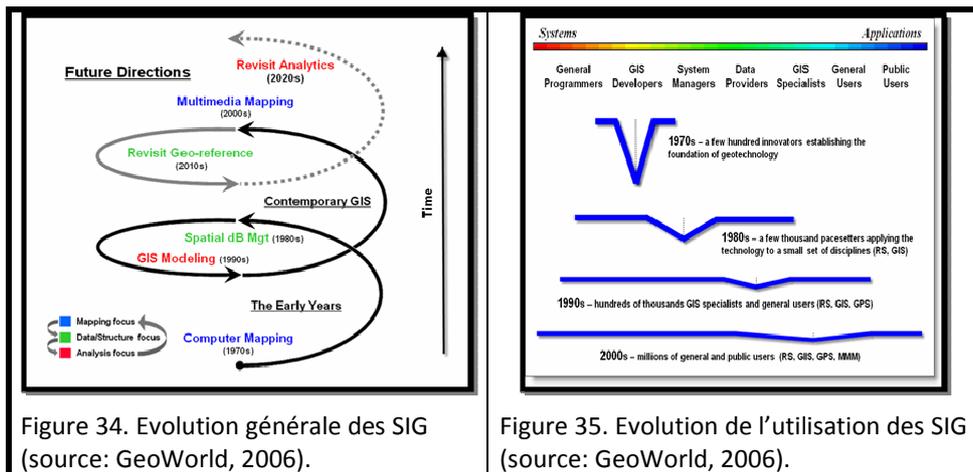
Des systèmes de gestion de bases de données spatiales sont alors développés. Ils font le lien entre la cartographie assistée par ordinateur et la gestion de bases de données non géoréférencées. Un identifiant est attribué à chaque objet géographique de telle manière que l'utilisateur puisse pour n'importe quel objet de la carte retrouver les informations associées à cet objet (les données tabulaires). Réciproquement l'utilisateur peut fixer des conditions de recherche sur les données tabulaires et afficher les objets géographiques correspondants sur la carte. Cette période est marquée par une demande croissante pour des données cartographiques. C'est l'époque où les utilisateurs s'équipent en tables à digitaliser et en scanners et où les grandes organisations internationales, comme le Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE) ou l'Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), investissent dans le développement de bases de données géoréférencées. C'est aussi à cette époque que je découvre le logiciel Arc Info sur station de travail (Sun Station). Le logiciel fonctionne alors avec des lignes de commandes : l'ergonomie et l'interactivité ne sont pas son fort.

- Analyse spatiale et modélisation, dans les années 1990

Les SIG évoluent dans les années 1990 d'une analyse descriptive, avec des empilements de couches, à une véritable analyse spatiale où les relations spatiales entre les objets sont calculées par des méthodes mathématiques. Les environnementalistes peuvent calculer des distances au réseau routier ou des densités relatives de bâti pour délimiter des habitats naturels. Il est possible de calculer des indices de diversité de paysages (formes et motifs) et cela contribue au développement de l'« écologie du paysage » qui se théorise et s'instrumentalise<sup>14</sup>. De plus, l'apparition des GPS fait apparaître dans les pays développés de nouvelles applications comme l'agriculture de précision ou la gestion de réseaux de distribution de l'eau.

- Multimédias et bases de connaissances, dans les années 2000.

Les SIG sont aujourd'hui présents dans la vie courante : Ipad, téléphones portables, GPS automobiles. Cette diffusion extraordinaire est sans doute liée aux progrès dans l'accessibilité aux données spatiales et dans les algorithmes de traitement, mais surtout à la miniaturisation des calculateurs et des écrans dans des objets usuels. Ainsi en 30 ans, les SIG sont passés d'un usage limité à quelques centaines de chercheurs à un usage grand public qui touche des centaines de millions de personnes (Fig. 35).



De nos jours, d'autres évolutions sont en cours. Depuis quelques années, la carte planimétrique 2D passe à la vue 3D du terrain et des polygones sont transformés en objets qui donnent une vision proche de la photographie. Mais l'évolution la plus spectaculaire est liée au développement de serveurs cartographiques sur le Web qui rendent accessibles à la fois des données géoréférencées et des outils de requête et de visualisation.

Les difficultés dans l'utilisation actuelle des SIG

Si cette technologie s'est incroyablement diffusée dans les sociétés du Nord, sa diffusion auprès des acteurs du développement les pays du Sud : institutions étatiques, collectivités territoriales ou associations de

<sup>14</sup> Forman R.T.T., 1995. *Land mosaics. The Ecology of Landscape and Regions*. Cambridge University press. Cambridge. 632 p.

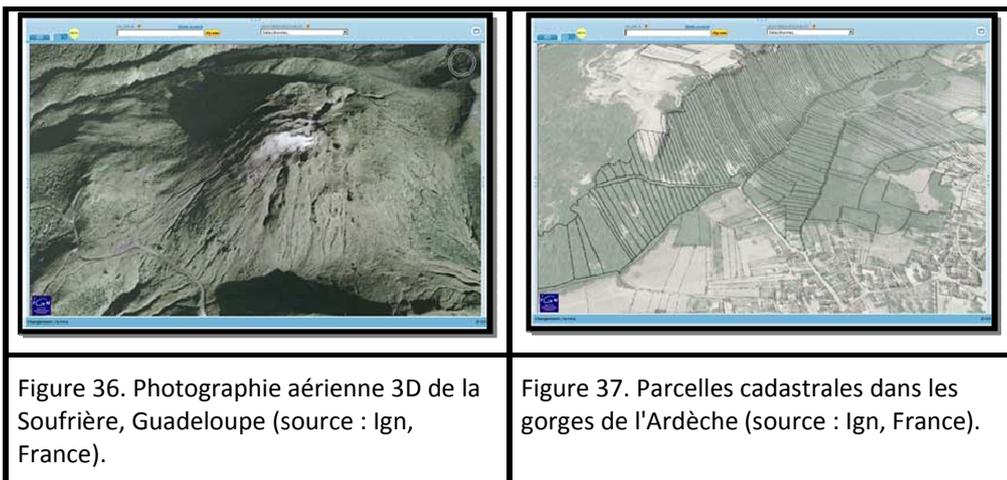
producteurs, reste encore limitée. Mais les choses changent rapidement : le large accès offert par GoogleEarth et GoogleMap, mais aussi la forte réduction des coûts et l'émergence de logiciels libres favorisent la diffusion des SIG dans les pays du Sud.

Dans ces pays, la principale difficulté à présent n'est pas l'accès à la technologie, mais plutôt la faible disponibilité de données et la difficulté à acquérir de nouvelles données sur le terrain. Car après l'engouement lié à la valorisation par les SIG des données existantes, on ne peut que constater la désaffection pour collecter de nouvelles données. Dans certains domaines – et c'est vrai en particulier pour l'agriculture - il est difficile de faire financer l'acquisition de données sur le terrain. Les recensements agricoles nationaux réalisés jusqu'alors dans beaucoup de pays du Sud sont peu à peu abandonnés, et si des dispositifs d'observation ne sont pas mis en place rapidement, les SIG eux-mêmes vont perdre beaucoup de leur intérêt.

Enfin, au-delà des aspects techniques des SIG qui ont été très largement étudiés ces dernières années et des difficultés à acquérir des données du terrain, peu d'études sont menées sur les bénéfices qu'apporte l'usage de cette technologie. Comment est-elle utilisée ? Comment contribue-t-elle à modifier les organisations et à influencer la prise de décision ? Cette évaluation est indispensable si l'on veut justifier les investissements réalisés et mieux intégrer ces outils dans les processus de négociation et de décision.

### **1.8 La diffusion et la socialisation de l'information**

Dans la « démocratisation » de l'information satellitale, GoogleEarth a joué un rôle très important en offrant au grand public un accès facile aux images satellitales en tout point du globe. Et les portails Web grand public de données géoréférencées se sont multipliés : c'est le cas avec le Geoportail de l'Ign (Fig. 36 et 37), ou avec les portails d'institutions comme l'Unep, la FAO ou l'Ifen. En Europe, les collectivités elles-mêmes (communes, communautés de communes, départements, régions) ont développé des portails de données incluant des images satellitales et des photographies aériennes, et elles ont développé des compétences remarquables. Il semble même que les collectivités territoriales innovent plus dans ce domaine que les laboratoires de recherche : peut-être est-ce le fait que ces outils sont largement orientés vers des applications.



Ce souci de diffuser des informations par le Web a été permanent dans les projets de recherche que j'ai mené. Pour chaque projet, un site Web spécifique a été développé, donnant accès à des données géoréférencées: projet Hcr- impact environnemental, projet Sherpa, projet Sinrem - Aguas sin Fronteras, ou projet Lupis, (Fig. 38 et 39).



Figure 38. Site du projet HCR (source : Imbernon, Cirad).

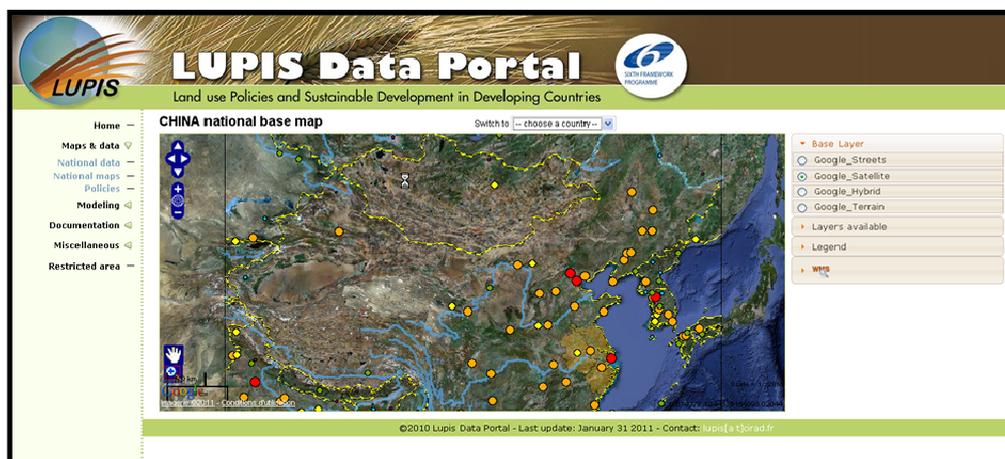


Figure 39. Portail de données du projet Lupis (source : Imbernon, Cirad).

La diffusion de l'information satellitale par les portails Web a permis de 'toucher' un public large. Malgré cela, l'utilisation de données satellitales dans la communauté des sciences humaines et sociales reste encore limitée. Les chercheurs mobilisent rarement des données géoréférencées et s'intéressent beaucoup plus au

pourquoi des faits qu'à leur localisation spatiale<sup>15</sup>. Or il existe un véritable enjeu scientifique à relier les analyses faites par les sciences sociales (que ce soit au niveau des individus, des ménages ou des communautés) à l'organisation spatiale des territoires (ressources, infrastructures, activités...) et aux changements observés grâce à la télédétection spatiale. «*To link people to pixels*»<sup>16</sup> est une façon caricaturale qu'ont les anglophones de résumer ce défi.

Le programme IGBP et le programme «International Human Dimension» (IHDP) ont tenté de concilier ces approches spatiales et sociales. Le projet «Land Use/Cover Change»<sup>17</sup> (LUCC), qui est une composante du «International Geosphere and Biosphere Programme» (IGBP), a mené de nombreuses études sur les causes des changements observés dans l'occupation ou l'utilisation des terres (agriculture itinérante, déforestation), les contraintes environ-nementales liées aux activités humaines (intensification agricole) ou l'impact des infrastructures (réseaux routiers). J'ai participé à quelques réunions d'experts de ce groupe. Mais outre les différences de 'culture scientifique' des chercheurs IGBP et IHDP, la principale difficulté rencontrée a été liée aux échelles spatiales.

S'il est en effet possible (bien que ce ne soit pas facile), de relier des classes d'occupation des terres depuis l'échelle locale jusqu'à l'échelle nationale par des processus de généralisation, il reste très difficile de relier des enquêtes sur des exploitations agricoles, des ménages ou des communautés à des données spatiales et de changer ensuite d'échelle<sup>18</sup>. Pour localiser les données sociales, les GPS sont à présent très utiles, et leur utilisation tend heureusement à se généraliser. Mais la mise en relation de ces données sociales localisées avec des images satellitaires reste difficile : la résolution spatiale des capteurs est souvent insuffisante pour décrire la variabilité des pratiques locales, alors que cette variabilité locale est elle-même porteuse d'informations. Une des méthodes employées pour accorder les échelles spatiales entre sciences sociales et sciences spatiales est d'agréger les données sur des grilles spatiales, par exemple sur des mailles de 10 km x 10 km<sup>19</sup>. Mais l'utilisation de telles grilles, en réduisant la variabilité spatiale, entraîne une perte d'information importante et donc une moindre capacité à expliquer les relations entre les « pratiques » des sociétés et les paysages agricoles télédéteçtés.

*Ces regards critiques portés sur les outils et les méthodes de la géomatique, en balayant rapidement l'éventail des possibilités en donneront, je l'espère, une vision globalement positive. Marquer les forces et faiblesses de la télédétection spatiale, ce n'est pas pour en rejeter l'intérêt, mais au contraire pour s'offrir la possibilité d'utiliser efficacement cette offre technologique et s'ouvrir de nouvelles perspectives de recherches et d'applications. Jusqu'à présent, j'ai utilisé des données satellitaires dans toutes mes activités de recherche. Je suis convaincu de l'apport de la télédétection pour la perception des paysages agricoles et la compréhension de leurs évolutions. Mon analyse n'est pas un regard tourné vers le passé; J'ai sans cesse cherché à m'approprier les techniques de l'avenir, avec par exemple l'utilisation des images à très haute résolution spatiale ou le développement des systèmes d'information Web. Mais mon expérience de terrain des pays du Sud, au contact des populations et des institutions nationales, face aux priorités du développement durable,*

<sup>15</sup> Rindfuss, R. and Stern, P. 1998. *Linking remote sensing and social science: The need and the challenges*. In Liverman, D., Moran, E., Rindfuss, R. and Stern, P. (eds.). *People and pixels*. National Academy Press, Washington, DC. P.1-27.

<sup>16</sup> Liverman et al., 1998. *People and pixels: linking remote sensing and social science*. Ed. National Academy Press, USA. 247 p.

<sup>17</sup> Lambin E. F., Baulies X., Bockstael N., Fischer G., Krug T., Leemans R., Moran E. F., Rindfuss R. R., Sato Y., Skole D., Turner II B. L., Vogel C., 1999. *Land-Use and Land-Cover Change Implementation Strategy*. IGBP Report n°48 and IHDP Report n°10. Edited by C. Nunes and J. I. Augé. 126 p.

<sup>18</sup> Fox et al., 2003. *people and the environment. Approaches by linking households and community surveys to remote sensing and GIS*.

<sup>19</sup> Deichmann, U., Balk, D. & Yetman, G. 2001. *Transforming population data for interdisciplinary usages: from census to grid*. Documentation for GPW Version 2 available only at [http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/GPW\\_documentation](http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/GPW_documentation).

*m'a forgé le sens de l'opérationnel, d'une recherche tournée vers l'application. L'important pour moi à la suite de ces premiers travaux de recherche n'a pas été l'outil en tant que tel, mais son utilisation au service de l'analyse de problématiques des pays du Sud.*

## **2 Un objet privilégié : l'occupation des terres, et ses implications**

### **2.1 De quoi parle-t-on ?**

#### **Les concepts de *land cover*, *land use* et *land use planning***

La couverture de la terre (*land cover*) est définie comme « la couverture biophysique de la surface de la terre : c'est par exemple la végétation ou le bâti urbain »<sup>20</sup>. Dans les paysages faiblement anthropisés, la couverture de la terre équivaut à l'expression des conditions naturelles de sol et de végétation. Par exemple, dans les régions tropicales humides où les températures et l'humidité de l'air sont élevées et où les sols sont profonds, c'est la forêt tropicale qui occupe l'espace; dans les régions intertropicales où alternent saison sèche et saison pluvieuse, et où les sols sont généralement moins profonds, la végétation est moins dense et prend alors la forme de savanes.

L'utilisation de la terre *land use* est définie comme « l'ensemble des arrangements et activités pratiqués par les populations sur une certaine couverture de la terre, faisant usage des ressources naturelles ou ayant un impact sur elles ». Dans ce contexte, l'importance est donnée à la fonction ou à la finalité de l'utilisation de la terre pour répondre aux besoins des populations et l'utilisation des terres va varier de nature et d'intensité selon le but recherché – production agricole ou espace récréatif par exemple. L'agriculture et l'urbain sont deux *land uses*. De ce fait l'utilisation de la terre est soumise à deux ensembles de facteurs : les facteurs humains et les facteurs naturels.

Bien que le *land cover* soit distinct du *land use*, ces deux termes sont souvent confondus. Pour expliciter cette différence de manière simple, nous pouvons dire que le «*land use*» est le 'comment les populations utilisent la terre'. Mais *land cover* et *land use* sont imbriqués et la limite entre les deux n'est pas très claire<sup>21</sup>. Par exemple, la limite sémantique entre un pâturage naturel - formation végétale composée de graminée - et une prairie au sens des agronomes, c'est-à-dire une culture de plantes fourragères, est difficile à identifier.

Au concept de *land use* est lié le concept de *land use planning*. Ce terme de *land use planning*, plus ancien, est apparu aux Etats-Unis à la fin de la Première Guerre mondiale dans des travaux sur la santé publique en milieu urbain<sup>22</sup>. Puis le *land use planning* est devenu la planification urbaine ou rurale de l'utilisation de la terre, en incluant des facteurs économiques, sociaux, culturels et environnementaux. A présent, le *land use planning* est plutôt défini comme le processus d'évaluation des 'alternatives' de *land use* et cette approche est mise en œuvre par la coopération technique allemande (Deutscher Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit – GTZ) au travers d'un processus itératif de dialogue avec les différents acteurs concernés<sup>23</sup>.

<sup>20</sup> FAO/UNEP. 1999. The Future of Our Land - Facing the Challenge. FAO/UNEP, Rome. 71p.

<sup>21</sup> Pete Fisher et al., 2005. *Land use and Land cover: Contradiction or Complement*. In Re-Representing GIS, Chichester, Wiley. p. 85-98.

<sup>22</sup> Purvis M., Grainger A., 2004. *Exploring sustainable development: geographical perspectives*. Ed. Earthscan, Londres, Royaume Uni. 388 p.

<sup>23</sup> GTZ, 1999. *Land Use Planning. Methods, Strategies and Tools*. GTZ, Germany. 212 p.

## Les changements d'utilisation des terres

Les changements dans l'utilisation des terres transforment la surface de la terre<sup>24</sup>. C'est le cas par exemple de l'expansion des villes de plus en plus peuplées ou de la déforestation pour de nouvelles terres agricoles. Ces changements d'utilisation des terres jouent un rôle central dans le changement global de notre environnement, car ils modifient les interactions entre la surface de la terre et l'atmosphère ou ils entraînent une perte de biodiversité.

C'est donc un facteur important à prendre en compte dans les recherches sur l'environnement et sur les sociétés. Son rôle a été souligné lors de nombreuses conférences internationales. Ainsi l'Agenda 21 des Nations-Unies a souligné que la combinaison de la croissance démographique et une surface limitée en terres agricoles accroissent la pression sur les terres.

Entre les continents et entre les pays, la surface en terres disponibles par habitant varie beaucoup : de 0,10 ha/personne en 1999 en Chine par exemple à 0,34 ha/personne en Amérique du Sud la même année (Tableau 1). Mais partout la pression sur la terre augmente et globalement la surface en terres disponibles par habitant ne cesse de diminuer.

	1970	1975	1980	1985	1990	1992	1995	1999
World	0,42	0,38	0,38	0,32	0,29	0,27	0,26	0,25
Europe	0,34	0,32	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26
Africa	0,62	0,58	0,52	0,36	0,32	0,28	0,26	0,26
S.Amer.	0,49	0,49	0,47	0,41	0,39	0,37	0,38	0,37
Asia	0,25	0,23	0,21	0,17	0,16	0,15	0,14	0,15
Nigeria	0,61	0,54	0,48	0,38	0,33	0,30	0,28	0,29
Senegal	-	-	0,44	0,41	0,37	0,32	0,30	0,27
China	0,16	0,13	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Indonesia	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15
Pakistan	0,34	0,32	0,27	0,24	0,20	0,17	0,17	0,15

Tableau 1: Evolution des surfaces en terres disponibles (ha) par personne entre 1970 et 1999, dans diverses régions du monde (source: FAO Statistical Yearbooks).

Dans les pays du Sud en particulier, quatre grandes tendances dans l'évolution de l'utilisation des terres peuvent être identifiées :

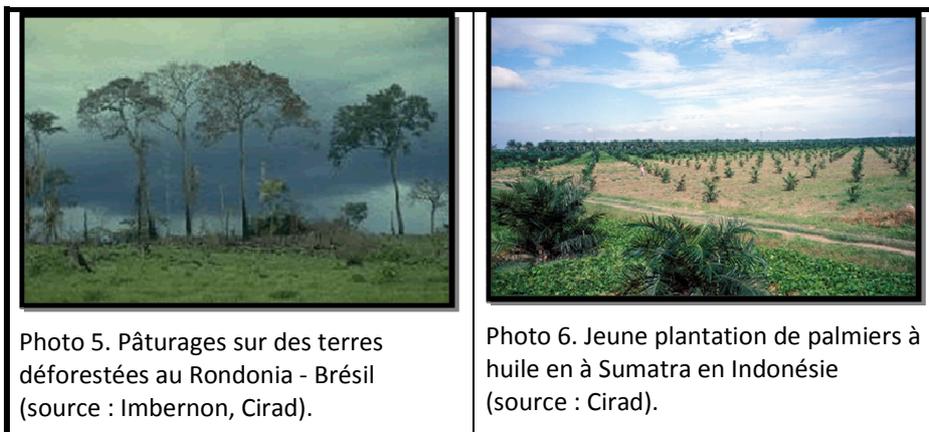
– l'expansion des terres cultivées pour répondre à la demande alimentaire croissante d'une population qui augmente ;

<sup>24</sup> Meyer W.B., Turner B.L., 1994. *Changes in land use and land cover. A global perspective*. Cambridge University Press., United Kingdom. 506 p.

- l'expansion des zones urbaines et périurbaines qui accueillent de plus en plus de populations ;
- la déforestation en zones tropicales humides au profit de l'agriculture ;
- la création de réserves naturelles pour la protection de l'environnement.

L'expansion des terres cultivées au détriment des forêts des zones tropicales humides se fait souvent de manière légale avec l'appui des politiques publiques. C'est par exemple le cas en Amazonie brésilienne et sur l'île de Sumatra en Indonésie où le processus de déforestation a été appuyé ces trois dernières décennies par les gouvernements respectifs : développement de réseaux et de services, et plans de colonisation au Rondonia (Brésil) ; programme de transmigration, plans de colonisations et incitations financières pour l'installation de colons à Sumatra.

Dans certaines de ces régions, de larges complexes agro-industriels de culture de palmier à huile, d'hévéa ou de soja occupent les espaces forestiers ou remplacent les systèmes de culture traditionnels. Ainsi entre 1970 et 1990, les îles indonésiennes de Sumatra, Sulawesi et Kalimantan ont perdu respectivement 50 %, 59 % et 60 % de leurs forêts, et la majeure partie de ces terres est actuellement utilisée par des plantations agro-industrielles de palmier à huile ou d'hévéa. Les changements d'utilisation des terres sont de fait liés le plus souvent à des facteurs politiques et socio-économiques. Mais ces changements ont rarement été caractérisés sur des périodes suffisamment longues pour en décrire précisément les trajectoires et bien en comprendre les déterminants.



Plus étudiés sont les impacts sociaux de ces changements d'utilisation des terres, et en particulier les situations de compétition et de conflits. C'est le cas entre paysans sans terre et propriétaires fonciers sur les frontières agricoles en Amazonie brésilienne, entre agriculteurs et pasteurs en zone sahélo-soudanienne en Afrique subsaharienne, entre forestiers et agriculteurs (zones périphériques des espaces protégés dans le golfe de Guinée), entre urbains et ruraux dans les zones périurbaines (riziculture sur l'île de Java, en Indonésie). Or ces changements dans l'utilisation des terres doivent être considérés sous leurs différentes facettes : sociale et environnementale bien sûr, mais aussi culturelle, technique, économique et politique.

## Les «driving forces» des changements d'utilisation des terres

La localisation des changements, la quantification des surfaces concernées et la caractérisation du type de changements de *land cover* ou de *land use* permettent de caractériser les processus qui sous-tendent les changements. Mais au-delà de cette caractérisation que l'on peut faire par télédétection spatiale, c'est l'analyse des facteurs et des processus qui sous-tendent les changements qui est intéressante. Ces facteurs de changements ont été décrits par IGBP comme soit directs : causes naturelles ou pratiques des populations par exemple, soit indirects : politiques publiques ou marchés par exemple. Selon les processus en jeu, les changements peuvent alors être « lents » ou « rapides », présenter un caractère linéaire ou non, et avoir des « portées » spatiales et temporelles différentes.

Quoi qu'il en soit, les changements d'utilisation des terres ne peuvent être compris indépendamment des facteurs socio-économiques qui les sous-tendent. Cela peut aller des droits fonciers aux structures de pouvoir, de la densité de population au niveau de développement économique et social, des marchés des produits agricoles aux subventions gouvernementales et aux politiques publiques mises en place<sup>25</sup>. Malheureusement, la plupart de ces facteurs sont auto-corrélés et interagissent les uns avec les autres et l'analyse en est particulièrement difficile. Stern *et al.* (1992)<sup>26</sup> ont regroupé les facteurs de changement de *land use* en six catégories : population, richesse, technologie, économie, structures politiques, comportements et valeurs. Les trois premières catégories ont été corrélées statistiquement avec les changements dans de nombreuses études, et les indicateurs de densité de population, de revenu national brut et de consommation d'énergie par habitant ont souvent été utilisés<sup>27</sup>. Peu de travaux ont porté sur les autres catégories.

Les résultats de ces tentatives d'explication des changements restent controversés, même avec le facteur 'population', le plus connu d'entre eux. Ainsi, à l'échelle globale, les néo-malthusiens soutiennent que la croissance démographique est la principale cause des changements et qu'elle entraîne une dégradation des ressources naturelles. A l'inverse, les tenants de la théorie de Boserup (1965)<sup>28</sup> affirment qu'il n'y a pas de dégradation supplémentaire, mais plutôt la croissance démographique entraîne une intensification des systèmes de production agricole. Les études menées sur des terrains différents ont montré que la croissance démographique est corrélée positivement avec l'expansion agricole, l'intensification agricole et la déforestation, mais que le niveau de ces corrélations reste faible<sup>29</sup>. Des études menées à l'échelle régionale en Afrique ont même montré que la densité de population est moins explicative que le niveau des ressources naturelles ou les facteurs économiques. La démographie n'est donc pas toujours le facteur le plus discriminant des changements d'utilisation des terres agricoles.

S'il est un domaine toutefois où le facteur population a un effet, c'est l'urbain dans les pays du Sud ; 175 des 298 métropoles de plus de 1 million d'habitants sont situées dans les pays du Sud. En Amérique latine au début des années 1950, on comptait seulement 6 villes de plus de 1 million d'habitants ; on en compte aujourd'hui 44, et 85 % de sa population devrait être urbaine en 2025. Pour l'ensemble des pays du Sud, 14 millions d'hectares ont été concernés par ce processus d'urbanisation entre 1990 et 2000.

<sup>25</sup> Turner, B. L., Moss R. H., and Skole D. L., 1993. *Relating land use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project*. Joint publication of the International Geosphere-Biosphere Programme (Report No. 24) and the Human Dimensions of Global Environmental Change Programme (Report No. 5). Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm. 65 p.

<sup>26</sup> Stern P.C., Young O.R., Druckman D., 1992. *Global environmental change: understanding the human dimensions*. National academy of science, USA. 292 p.

<sup>27</sup> Meyer W. B. and Turner II B.L., 1992. Human population growth and land use/land cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 23. p. 39-61.

<sup>28</sup> Boserup, E. 1965. *The conditions of agricultural growth: the economics of agrarian change under population pressure*. Allen and Unwin, London. 128 p.

<sup>29</sup> Bilborrow, Richard E. 1992. *Population Growth, Internal Migration and Environmental Degradation in Rural Areas of Developing Countries*. *European Journal of Population*, vol.8. p. 125-148.

Les études qui associent le niveau économique et technologique aux changements de land use sont moins nombreuses. La pauvreté a souvent été associée aux dégradations environnementales, mais ce facteur n'apparaît pas primordial et d'autres facteurs sociaux peuvent être pris en compte<sup>30</sup>. Les capacités technologiques elles-mêmes peuvent modifier l'usage des ressources naturelles : par exemple, l'ouverture de routes permet de donner accès à des ressources naturelles auparavant inaccessibles. C'est le cas au sud du Cameroun avec l'ouverture de pistes par les concessions forestières ou en Amazonie brésilienne avec le goudronnage de la route BR163. De nombreuses études ont été menées sur l'effet de ces infrastructures routières: j'ai moi-même mené des analyses de ce type dans le projet Alternatives to Slash and Burn<sup>31</sup>. Mais plus rares sont les études sur l'impact de nouvelles variétés ou technologies agricoles dans les pays du Sud : ces études sont souvent très localisées. De nouvelles variétés de cultures issues de la recherche, plus productives ou moins consommatrices en intrants, pourraient avoir des effets importants en permettant de produire plus sur un même espace ou de moins dégrader les ressources naturelles.

Enfin trois autres facteurs sont rarement pris en compte dans les études de changement de land use: les politiques publiques incluant les systèmes d'échange, de propriété et de contrôle, les structures politiques impliquant les organisations et leur gouvernance, et les pratiques individuelles ou collectives. Le changement de modèle foncier, le passage d'un système agricole d'autosubsistance à un système marchand ou la montée en puissance de mouvements écologistes peuvent en effet avoir un impact sur l'utilisation des terres. Mais, même si la littérature est relativement riche « d'histoires » localisées, les études globales ou même régionales prenant en compte ces facteurs politiques et organisationnels sont rares.

Enfin, depuis quelques années, un nouveau facteur mobilise la communauté scientifique et ce facteur est global: c'est le changement climatique. Dans les interactions à l'interface entre la surface de la terre et l'atmosphère, l'utilisation des terres joue un rôle important dans l'émission de gaz à effet de serre (vapeur d'eau, méthane ou dioxyde de carbone), dans la modification des bilans radiatifs (albedo et rayonnement net), ou dans la production de flux de chaleur latente (évapotranspiration). Les types de 'land use' eux-mêmes et les scénarios d'évolution sont des données d'entrée importantes dans les modèles climatiques qui simulent ces interactions et sur lesquels s'appuient les experts du climat. Pour ma part, si je suis convaincu du rôle joué par l'utilisation des terres dans les interactions avec l'atmosphère, je n'ai jamais été amené à travailler sur les effets du changement climatique sur l'utilisation des terres dans les pays du Sud. Malgré le discours environnementaliste, je n'ai pas constaté par moi-même ce type d'effet sur le terrain. Je montrerai ci-dessous quatre études de cas sur lesquelles j'ai mené des recherches : la déforestation tropicale par les agricultures sur brûlis ; la pression sur les hautes terres du mont Kenya; l'effet des politiques publiques, des marchés et des migrations sur l'occupation des terres en El Salvador; et l'impact environnemental des populations réfugiées en Guinée lors du conflit de Sierra Leone et du Libéria.

## **2.2 La déforestation tropicale par les agricultures sur brûlis dans les grands bassins forestiers tropicaux**

Pendant longtemps, les explorations du XIXe siècle ont instillé dans les esprits l'idée selon laquelle les ressources des forêts tropicales ne pourraient jamais être épuisées. Ce n'est que tardivement, dans les années 1960, que cette idée a été remise en cause. En 1972, un article de trois chercheurs mexicains, paru dans la revue « Science », sonnait l'alarme : « la forêt tropicale est fragile, c'est une ressource non-renouvelable »<sup>32</sup>.

<sup>30</sup> Kates R.W. and Haarman V., 1992. *Where the poor live: Are the assumptions correct?* Environment, vol. 34, p. 4-28.

<sup>31</sup> Imbernon J., 2000. *Déforestation et pression démographique au Rondonia, Brésil*. Bois et Forêts des Tropiques, vol. 266, p. 23-33

<sup>32</sup> A. Gomez-Pompa, C. Vazquez-Yanes, S. Guevara, 1972. *The Tropical Rain Forest: A Non-Renewable Resource*. Science, vol. 117, n° 4051, p. 762-765.

C'est alors, et seulement alors, que la communauté internationale s'est vraiment intéressée au sujet et a commencé à considérer la déforestation tropicale comme un véritable enjeu environnemental.

Dans ces forêts tropicales, l'agriculture itinérante sur brûlis est une pratique traditionnellement depuis des siècles et même des millénaires. Cette pratique a été durable jusqu'à nos jours. Elle a été largement étudiée par des agronomes français comme Dufumier<sup>33</sup> qui en ont montré l'intérêt pour mobiliser les apports fertilisants du brûlis et la régénération de la fertilité des sols par les jachères longues. Mais de nouvelles pratiques d'agriculture sur brûlis sont apparues pour étendre l'espace agricole dans des zones de « frontières » entre agriculture et forêt et coloniser ainsi de vastes espaces : c'est le cas en Amazonie, dans le Sud-est asiatique et dans une moindre mesure en Afrique centrale. Et dans les années 1990, des environmentalistes nord-américains ont considéré que l'agriculture sur brûlis sous toutes ses formes était devenue une des principales causes de la déforestation et qu'il fallait rechercher des alternatives à cette pratique. C'est dans ce contexte que le projet « Alternatives to Slash-and-Burn » (ASB) a été lancé avec l'appui du Fonds pour l'environnement mondial (GEF) et que j'ai été amené à rejoindre ce projet en 1996 à l'International Centre for AgroForestry (ICRAF-Nairobi) qui coordonnait ce projet.

### L'importance du processus de déforestation

Les principaux bassins forestiers tropicaux concernés par la déforestation sont le bassin amazonien en Amérique du Sud, l'Afrique centrale et l'Asie du Sud-est (voir Figure 40). La déforestation dans ces trois régions forestières était importante et l'Organisation des Nations-Unie pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estimait que, durant la période 1980-1990, c'est approximativement 17 millions d'hectares - l'équivalent de la Belgique - de forêts tropicales qui disparaissaient tous les ans. Les estimations faites par la FAO dans le « Global Forest Resources Assessment » en 2005<sup>34</sup> montrent que ce processus de déforestation s'est poursuivi dans ces bassins forestiers tropicaux, en s'amplifiant même dans le Sud-est asiatique (Tableau 2). C'est sur ces trois bassins forestiers que les terrains d'étude du projet ASB ont été répartis.

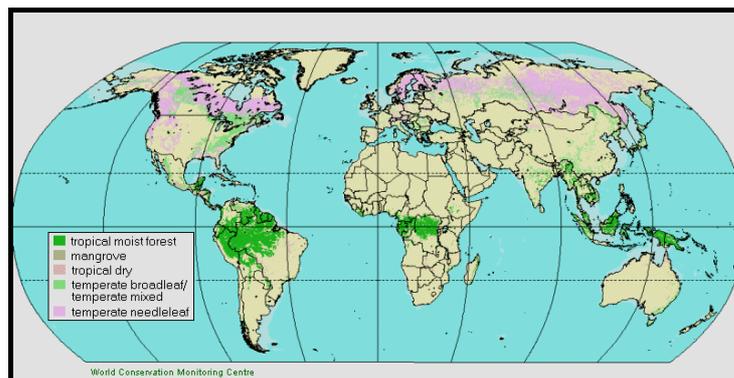


Figure 40. Répartition mondiale des grands types de forêts (source : WCMC).

<sup>33</sup> Dufumier M., 2004. *Agricultures et paysanneries des Tiers mondes*. Editions Karthala, France. 598 p.

<sup>34</sup> FAO, 2005. *Global Forest Resources Assessment*. FAO, Italy. 320 p.

	2005 Superficie totale (1 000 ha)	1990 - 2000 Taux annuel de déforestation (%)	2000 - 2005 Taux annuel de déforestation (%)
<b>Afrique de l'Est et Centrale</b>	277 829	0,60	0,50
<b>Amérique du Sud</b>	831 540	0,44	0,50
<b>Asie du Sud et du Sud-Est</b>	283 127	0,80	1,00

Tableau 2. Surfaces de forêts tropicales en 2005 et taux de déforestation (source : FAO, FRA).

Avant de poursuivre sur ce processus de déforestation tropicale, je souhaite remettre ce processus dans une perspective historique et une dimension globale, en incluant les forêts du Nord. En remontant loin dans le passé, les travaux de Bryant (1997)<sup>35</sup> montrent que durant les derniers 8000 ans le monde aurait perdu environ 40 % des 6 000 millions d'hectares que les forêts comptaient alors. Les forêts tempérées ont elles-mêmes été intensément exploitées dès le premier millénaire en Chine, au moyen âge en Europe et au XVIIIe siècle en Amérique du Nord, alors que les forêts tropicales sont restées quasi intactes jusqu'au début du XIXe siècle. La déforestation n'est donc pas un processus nouveau et les pays du Nord ont fortement contribué dans le passé à la réduction des surfaces forestières (Fig. 41).

Quoi qu'il en soit, toutes les études s'accordent sur une rapide dégradation des forêts tropicales depuis le XIXe siècle et une accélération du processus à la fin du XXe siècle (Fig. 42). Les extrapolations faites à partir des tendances les plus récentes sont particulièrement alarmantes, mais il faut se garder d'être trop pessimiste. Des efforts ont été faits ces dernières années dans les pays du Sud pour réguler la déforestation et protéger de vastes espaces forestiers. De plus les chiffres sur la déforestation ne concernent que les régions tropicales alors qu'une augmentation significative des superficies forestières est observable depuis 1995 dans des pays du Nord, et en particulier dans les pays européens (FAO, 2005). Globalement la déforestation de la planète n'est pas si catastrophique que ce que l'on pourrait le penser.

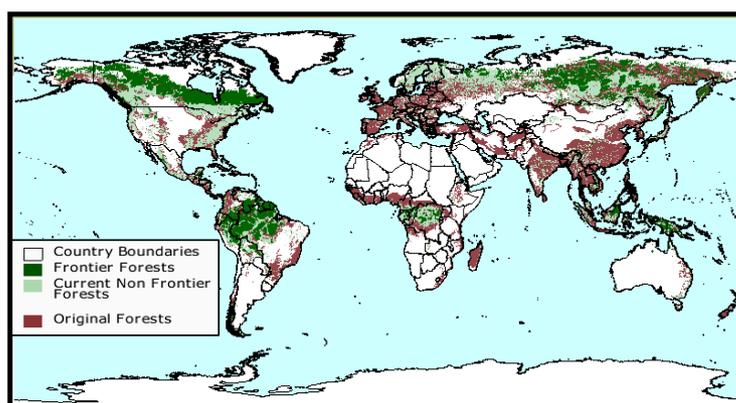


Figure 41. Evolution des forêts depuis 8000 ans (source : Bryant, 1997).

<sup>35</sup> Bryant D., 1997. *Last forest frontiers: ecosystems and economies on the edge*. Ed. World Resources Institute, Washington DC, USA. 44 p.

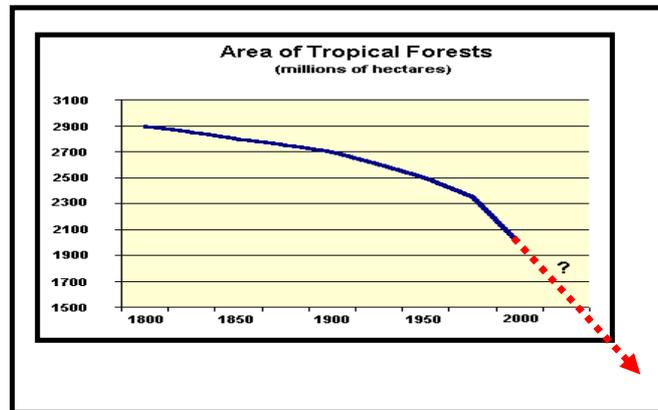


Figure 42. Evolution de la surface des forêts tropicales depuis 1800 (d'après Bryant (1997)).

D'après la FAO, les causes de la déforestation tropicale sont principalement liées à l'agriculture itinérante (45 %). Bruenig pour sa part estime que ce sont 60 % de la déforestation qui seraient dus à ce type d'agriculture, 30 % aux infrastructures et aux projets de développement (barrages, déplacement de populations, industries) et 10 % seulement à l'exploitation forestière. Mais les différentes causes sont interdépendantes et il est difficile, sinon impossible, d'évaluer précisément la part de chacune des activités humaines. Les causes ont de plus des effets sur la déforestation très variables d'une région à l'autre : l'exploitation forestière est significative en Malaisie ou au Gabon, alors qu'en Amazonie brésilienne ce sont plutôt les projets de développement agricole et l'élevage qui seraient les causes principales de la déforestation.

### Le lien entre déforestation et environnement global

Depuis la conférence de Villach en 1985<sup>36</sup>, le rôle des forêts tropicales dans la régulation des processus atmosphériques est reconnu : les forêts fixent le carbone de l'air dans la biomasse aérienne et dans le sol (Figure 43) et elles limitent les effets des gaz à effets de serre qui entraînent le réchauffement global. D'après l'inventaire forestier de la FAO FRA2010<sup>37</sup>, les forêts du monde renfermeraient à elles seules 289 gigatonnes (Gt) de carbone dans leur seule biomasse. Le processus de déforestation lui-même, par les feux de forêt, libère du carbone, mais ces émissions ne représentent que 1,7 gigatonne, comparée aux 5 gigatonnes qui proviennent de la consommation des énergies fossiles<sup>38</sup>.

<sup>36</sup> Grinevald J., 1992. *Impact assessment of carbon dioxide and other green house gases in climatic changes*. Conference organised by UNEP. *De Carnot a Gaia: histoire de l'effet de serre*. In *La Recherche*, n° 243, p. 532-538.

<sup>37</sup> FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment*. 2010. FAO, Rome. 371 p.

<sup>38</sup> Goudrian J., 1992. *Où va le gaz carbonique? Le rôle de la végétation*. In *La Recherche*, n° 243, p.597-604.

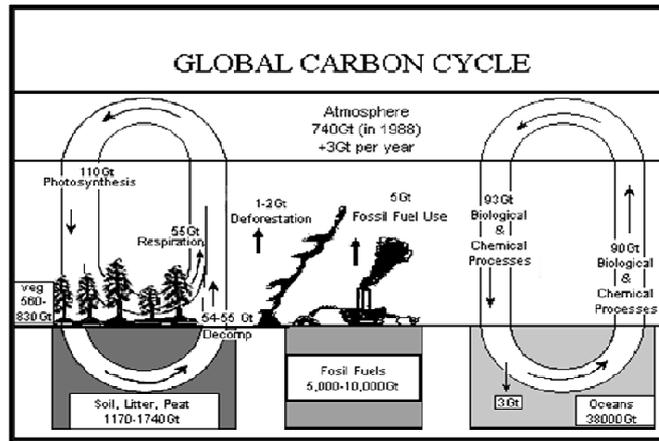


Figure 43. Sources et puits de carbone (source: U.S. Environment Protection Agency).

En plus de relâcher du carbone lors du brûlis, la déforestation tropicale diminue aussi la capacité de fixation de carbone à la surface de la terre en diminuant le stock de biomasse. Ainsi, comme le dioxyde de carbone contribue pour 50 % à l'effet de serre, l'impact de la déforestation serait de 10 % sur l'effet de serre. Ce n'est pas négligeable, mais la principale cause de l'effet de serre, rappelons-le à nouveau, reste l'industrie. En 2007 l'industrie des Etats-Unis à elle seule contribuait pour 19,9 % des émissions de CO<sub>2</sub> et celle de la Chine pour 22,3 %.

Enfin, au-delà du carbone, un enjeu majeur pour les forêts tropicales reste la préservation de la biodiversité dans la mesure où les espèces tropicales (plantes, insectes, mammifères...) représentent entre 50 % et 90 % du total des espèces de la planète<sup>39</sup>. Les projections faites par le World Research Institute (WRI) en ce domaine ne sont pas encourageantes puisque de 10 à 35 % des espèces qui étaient présentes en 1990 pourraient avoir disparu en 2040 (Figure 44).

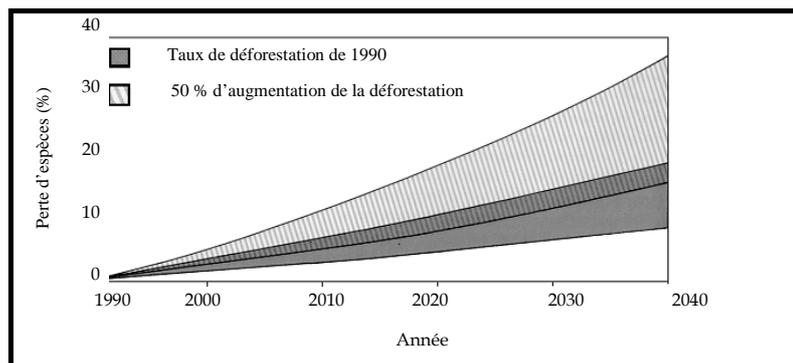


Figure 44. Pourcentage d'espèces susceptibles de disparaître dans les forêts tropicales dans les prochaines décennies (source: WRI 1992).

<sup>39</sup> Sayer J., 1991. *Conservation et protection des forêts tropicales humides: le point de vue de l'alliance mondiale pour la nature*. In Unasylva, vol. 42, n° 166. p. 40-45.

## L'agriculture sur brûlis, facteur de déforestation

Peu d'attention était portée aux processus de déforestation jusque dans les années 1980, exception faite de certaines ONG. Des organisations internationales comme la Banque mondiale ont même encouragé dans les années 80 les politiques de colonisation des espaces forestiers : elle a soutenu les projets d'élevage extensifs en Amazonie brésilienne ou les projets de plantations agro-industrielles de palmier à huile et d'hévéa dans le Sud-Est asiatique.

C'est dans ces années 1980 qu'a commencé le suivi de la déforestation par satellite. Il a été systématisé par la FAO avec le Forest Resource Assessment (FRA) qui a renouvelé l'évaluation régulièrement, tous les 10 ans au début, tous les 5 ans maintenant. Les premières estimations faites par la FAO dans ces années 1980 à partir d'images Landsat avaient été critiquées, en particulier par l'Institut National de Recherches Spatiales du Brésil (INPE). La méthode était encore peu fiable et l'échantillonnage à 10 % prenait mal en compte la diversité des forêts. Dans les FRA suivants – et en particulier les FRA 2000 et FRA 2005 - ces estimations ont été améliorées et de fait elles sont maintenant peu critiquées par les Etats. Il faut reconnaître que ces statistiques de la FAO restent la seule source exhaustive et continue d'estimation des surfaces forestières et des surfaces déforestées<sup>40</sup>, et que les autres initiatives internationales dans ce domaine : projet TREES du Centre Commun de recherche (CCR) d'Ispra et projet Pathfinder de la NASA, n'ont pas eu de suite.

Dans le processus de déforestation tropicale, l'agriculture itinérante traditionnelle a un rôle que j'ai étudié avec le projet Alternatives to Slash-and-Burn. Cette agriculture se caractérise par une rotation avec des périodes de culture relativement courtes de un à trois ans, et des périodes de jachère longues pouvant aller jusqu'à vingt ans. Les parcelles de culture sont nettoyées par brûlis, et de là vient le terme d'agriculture sur brûlis souvent utilisé pour décrire ce système de culture. La pratique traditionnelle consiste à abattre, ébrancher et laisser sécher les arbres, puis à les brûler avant de mettre la parcelle en culture après une préparation du sol minimum.

La définition donnée par la FAO pour les agriculteurs itinérants inclut trois types : i) les vrais agriculteurs itinérants qui pratiquent ce système de culture traditionnelle ; ii) les migrants qui sont motivés par l'accès à la terre ; et iii) les agriculteurs employés par des acteurs financiers peu visibles. Il n'existe donc pas une agriculture sur brûlis, mais différentes formes d'agriculture sur brûlis. Malgré cela, la Banque mondiale continue à considérer comme agriculteurs itinérants à la fois les agriculteurs traditionnels des zones forestières du Sud-Cameroun, les migrants d'Amazonie brésilienne et les planteurs d'hévéa de Sumatra.

Dans l'agriculture sur brûlis traditionnelle, le rôle du feu est central, car il a des effets bénéfiques sur les sols et la végétation<sup>41</sup>. Tout au long de la période de jachère qui suit la culture, les éléments minéraux sont accumulés dans la biomasse aérienne, mais aussi dans la couche superficielle du sol par la minéralisation de la litière et la fixation de l'azote. Dans la biomasse aérienne de la jachère, ce processus peut être rapide comme cela a été montré dans une forêt du Zaïre (actuelle République démocratique du Congo) : la quantité de minéraux stockés atteint un plateau après seulement 8 années de jachère (Figure 45). Le brûlis de cette jachère forestière permet ensuite de recycler rapidement ces éléments minéraux qui seront disponibles pour l'agriculture.

<sup>40</sup> D'autres projets du même type ont été menés dans les années 1990, comme le projet Pathfinder de la NASA et le projet TRESS du Centre Commun de Recherche d'Ispra.

<sup>41</sup> Peters WJ, Neuenschwander LF. 1988. *Slash and burn. Farming in the third world forest*. University of Idaho press, Moscow, Idaho, 113 p.

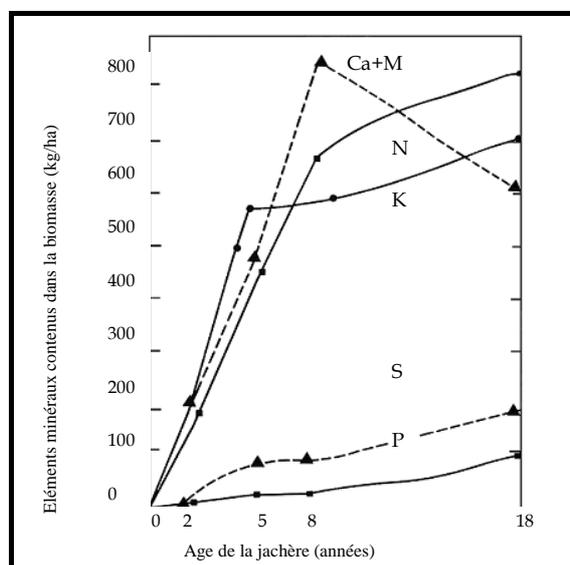


Figure 45. Accumulation d'éléments minéraux dans une jachère (source : Peters *et al.*, 1988).

Des travaux ont tenté de quantifier les gains et les pertes d'éléments minéraux dans de système d'agriculture sur brûlis. Ainsi Sanchez (1976)<sup>42</sup> a montré que calcium, magnésium et potassium échangeables dans les sols pouvaient tripler après brûlis (Tableau 3) et qu'une quantité significative de phosphore sous forme de cendres était ajoutée au sol. Avec de bonnes raisons donc, les agriculteurs justifient le brûlis par l'amélioration des sols et l'augmentation des rendements agricoles.

	Avant brûlis	Après brûlis	Après récolte
Phosphore (ppm)	3,9	32,5	18,5
Potassium (ppm)	208	296	177
Calcium (me %)	0,3	1,4	1,4
Magnésium (me %)	0,3	1,4	1,4
Aluminium (me %)	1,6	0,6	0,7
pH	4,7	6,5	5,6

Tableau 3. Effets du brûlis sur l'horizon de surface des sols (Source: Peters *et al.*, 1988)<sup>43</sup>.

<sup>42</sup> Sanchez PA. 1976. *Properties and management of soils in the tropics*. John Wiley and Sons, New York. 618p.

<sup>43</sup> Peters WJ, Neuenschwander LF. 1988. *Slash and burn. Farming in the third world forest*. University of Idaho press, Moscow, Idaho, 113 p.

Mais l'effet du brûlis sur les rendements agricoles reste limité dans le temps : il ne dure tout au plus que 2 à 5 ans. Dès la première année de culture, les rendements chutent fortement (Figure 46) et cette rapide diminution de la productivité explique la mise en jachère des parcelles au bout de 2 à 5 ans et le caractère itinérant de cette agriculture.

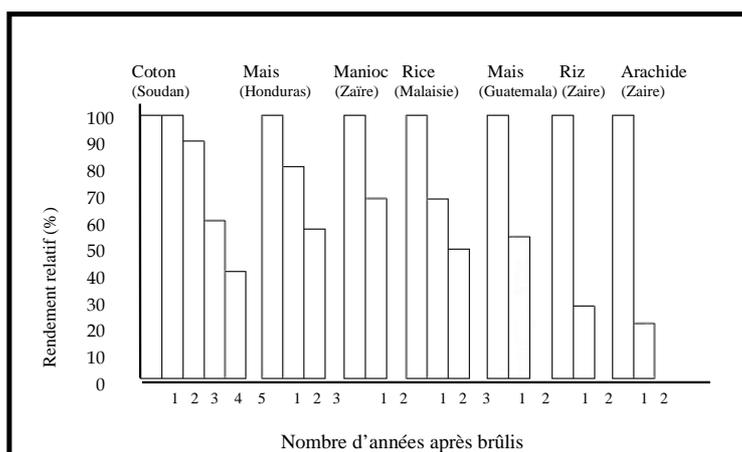


Figure 46. Baisse des rendements des cultures sur brûlis sans apport d'engrais (source : Ruthenberg, 1971)<sup>44</sup>.

Cette agriculture sur brûlis traditionnelle se pratique généralement dans les régions faiblement peuplées<sup>45</sup>, avec moins de 8 habitants au km<sup>2</sup>. A ce niveau de densité de population, le système de culture est durable : il y a un équilibre entre la population et les ressources naturelles. Toutefois, dès lors que s'exerce une pression démographique et que la durée de jachère est réduite, le système n'est plus durable : les sols se dégradent et le couvert forestier ne se régénère plus assez. Cette situation se rencontre actuellement dans de nombreuses régions forestières et c'est le cas de la région de Yaoundé au Cameroun ou de Pucallpa au Pérou, deux terrains d'étude du projet ASB.

Mais la pression sur les forêts tropicales est aussi et surtout de nos jours le fait de nouveaux types d'agriculteurs qui pratiquent l'agriculture sur brûlis dans le seul but de tirer rapidement profit des terres disponibles et de s'approprier l'espace. La jachère n'a pas d'importance pour régénérer la fertilité des sols : elle n'est pas partie constituante du système et elle disparaît d'ailleurs le plus souvent. C'est d'ailleurs dans les régions où se trouvent ces agriculteurs que le processus de déforestation par brûlis est le plus important.

<sup>44</sup> Ruthenberg H. 1971. *Farming systems in the tropics*. Clarendon Press, Oxford. 286 p.

<sup>45</sup> Nye PH, Greenland DJ. 1960. *The soil under shifting cultivation*. Journal of plant nutrition and soil science, vol. 95. Technical Communication no 51. p. 165.

## Le projet Alternatives to Slash-and-Burn (ASB)

J'ai travaillé pendant 3 ans dans ce projet, basé à l'ICRAF à Nairobi. De là, je travaillais sur des terrains situés dans les grands bassins forestiers tropicaux : sites de Pucallpa et Yurimaguas au Pérou, de Theobroma (Rondonia) et Pedro Peixoto (Acre) au Brésil, de Mbalmayo au Cameroun et de Lampung à Sumatra (Indonésie). Ces différents sites présentaient à des degrés divers les deux formes d'agriculture sur brûlis :

- une agriculture traditionnelle à base de maïs, de haricot, de yucca et de banane plantain au Sud-Cameroun (M'Balmayo) et en Amazonie péruvienne (Yurimaguas et Pucallpa) ; et à base d'hévéa (« *jungle rubber* ») associé à la riziculture à Sumatra (Lampung) ;
- et une agriculture sur brûlis de colonisation en Amazonie brésilienne (Pedro Peixoto et Theobroma) avec la riziculture et l'élevage (parfois ensuite le soja dans le Rondonia) ; et sur l'île de Sumatra dans le cadre du programme de transmigration et pour des plantations industrielles de palmier à huile et d'hévéa.

Sur ces sites, j'ai utilisé de façon systématique l'imagerie satellitale pour analyser les structures spatiales et les dynamiques des paysages de déforestation par l'agriculture sur brûlis. Le plus souvent, les traitements de ces images ont été réalisés selon une nomenclature simplifiée en considérant le paysage comme une mosaïque spatiale de forêts et de non-forêts. Dans un premier temps, j'ai utilisé les données AVHRR-NDVI du projet FAO-ARTEMIS à 7,6 km de résolution pour la période de 1981 à 1991. Ces données avaient été calibrées par la FAO, mais non corrigées des effets atmosphériques : de fait les variations observées sur les synthèses mensuelles de NDVI étaient souvent dues à des variations de contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère et il n'était pas possible d'observer avec ces images à faible résolution spatiale le processus de déforestation.

Des images du capteur AVHRR à 1 km de résolution ont ensuite été traitées sur chacun des sites. Ces images étaient fortement 'polluées' par la couverture nuageuse souvent présente sur ces zones d'étude et sans doute la nébulosité a été une des difficultés majeures pour utiliser les images optiques. Sur une série de 11 images AVHRR du Cameroun fournie alors par l'Agence spatiale européenne, seule une image était à peu près dégagée de nuages (Fig. 47).

Cette image a été classée à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique sur les canaux 1, 2 et 3, pour regrouper les pixels sur la base de signatures spectrales, en imposant le nombre de classes et en forçant manuellement certaines classes par photo-interprétation. Peu de classes ont été retenues (5) de manière à simplifier la nomenclature et à réduire les erreurs (Tableau 4). Les classes de forêts correspondent à des forêts primaires et secondaires (recrus) sans distinction, les agroforêts à des plantations de cacao sous ombrage et les savanes sont formations végétales dominées par à *Pennisetum purpureum* et *Imperata cylindrica*.

Cette classification donne une idée des surfaces forestières et de leur répartition à l'échelle régionale. Elle est toutefois relativement imprécise et il est difficile d'en évaluer la qualité sur le terrain. Une cartographie plus détaillée a nécessité des données spatiales de meilleure résolution : des images Spot. Cette cartographie a permis de mieux caractériser l'occupation des terres sur les terrains d'étude, et de mettre en relation les dynamiques locales de déforestation avec des facteurs sociaux, économiques et environnementaux. Ces travaux ont mis en évidence en les différences entre les formes d'agriculture sur brûlis. Un aperçu en est donné dans les pages suivantes.

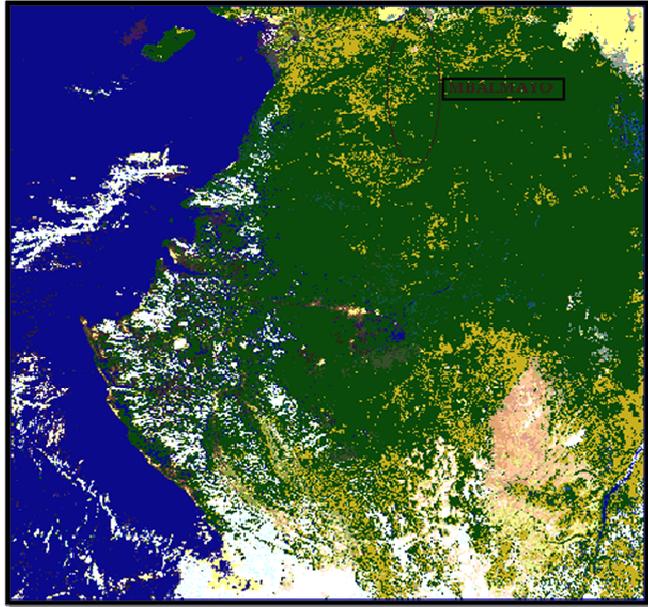


Figure 47. Image AVHRR du Sud-Cameroun en janvier 1993 (source : Imbernon, Cirad).

	forest	agroforest	savannah	littoral forest	mangrove	clouds
<b>area (1000 ha)</b>	28 949	4 981	553	648	219	863
<b>% of total area</b>	79,9	13,8	1,5	1,8	0,6	2,4

Tableau 4. Occupation des terres au Sud Cameroun sur une image AVHRR de 1993 (source : Imbernon, Cirad).

## Yurimaguas, Pérou

Dans la région de Yurimaguas, l'agriculture est concentrée le long de la rivière Huallaga et ses affluents (Fig. 48). Les exploitations anciennes (plus de 25 ans) associent extraction sélective d'essences forestières, cultures vivrières, vergers, élevage et pêche. Ces exploitations ont accès aux marchés via le réseau fluvial (Photo 7) car il n'y a pas de routes. Leur superficie est importante (en moyenne 40 ha) et elles pratiquent l'agriculture sur brûlis pour les cultures vivrières : maïs, banane plantain et riz (Fig. 49). Les jachères ont une durée de 8 à 12 ans et les sols ne sont pas dégradés.



Photo 7. Le transport fluvial à Yurimaguas peut atteindre Belem au Brésil (source : Imbernon, Cirad).

D'autres exploitations sont situées plus en profondeur dans la forêt et sur les reliefs. Il s'agit de migrants pauvres dont l'exploitation ne dépasse pas 8 hectares. Les cultures sont associées : maïs avec riz ou haricot, ou plantains avec manioc (Photo 8). La durée de jachère est de 4 à 5 ans pour le riz et de 6 à 8 ans pour le maïs.



Photo 8. Une parcelle de plantain et manioc en forêt (source : Imbernon, Cirad).

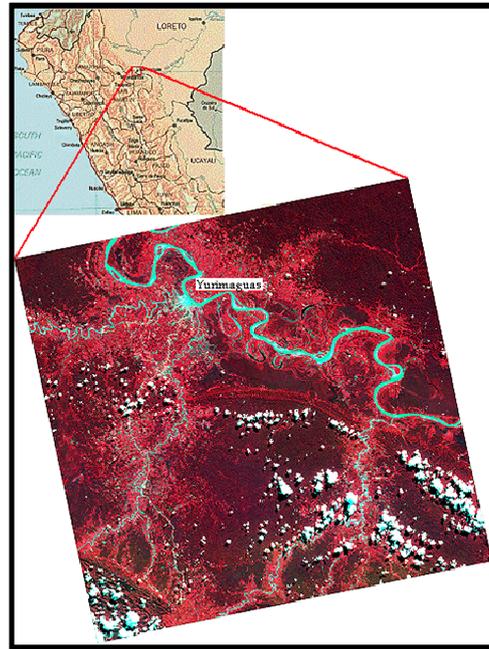


Figure 48. Image Spot de 1995 sur le site de Yurimaguas): en rouge, les forêts, en clair les cultures le long du réseau hydrographique en bleu (source : Imbernon, Cirad).

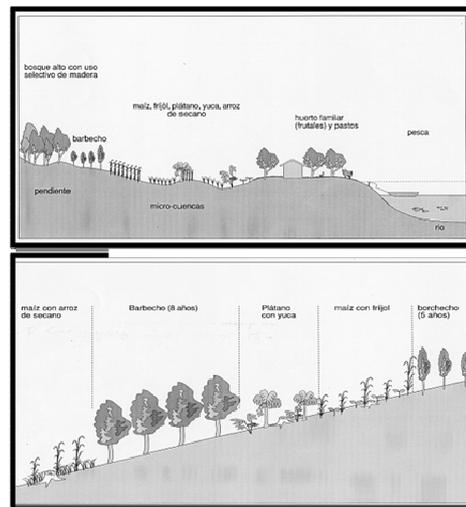


Figure 49. Les deux systèmes traditionnels d'agriculture sur brûlis à Yurimaguas (source : Imbernon, Cirad).

### M'Balmayo - Cameroun.

Dans la région de M'Balmayo, et dans toute la région qui s'étend de Yaoundé à la frontière de la Guinée équatoriale (Fig.51), l'agriculture sur brûlis est largement pratiquée (Photo 9).

La séquence des activités est la suivante: abattage et brûlis de la forêt pour ouvrir une parcelle (« essep » en dénomination vernaculaire), culture du plantain et du concombre pendant 2 ans, puis jachère durant 5 ans, suivie de cultures d'arachide et de maïs intercalées dans du manioc et du plantain, puis enfin mise en jachère de longue durée (Fig. 50).

Cette séquence a de nombreuses variations et la durée de la jachère longue varie de 8 ans autour de M'Balmayo jusqu'à plus 20 ans au sud d'Ebolowa.

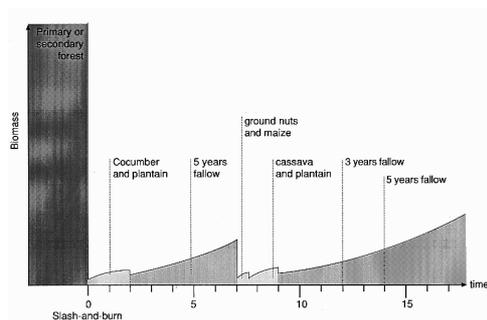


Figure 50. Séquence de mises en cultures sur une parcelle d'abattis-brûlis au sud du Cameroun (source : Imbernon, Cirad).

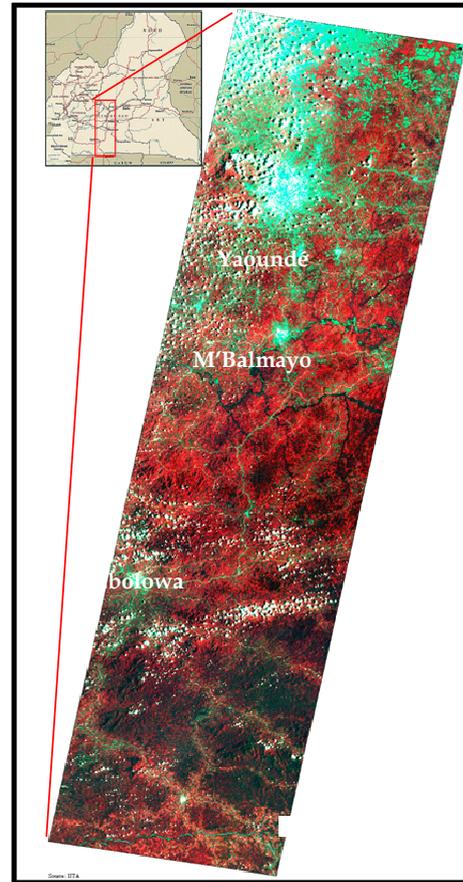


Figure 51. Mosaïque d'images Spot de 1995 sur le site de M'Balmayo (Cameroun) : en rouge, les forêts, en bleu les villes et en rouge clair les zones de culture (source : Imbernon, Cirad).



Photo 9. Ouverture d'une parcelle de culture dans la forêt à Mbalmayo – Cameroun (source : Imbernon, Cirad).

### Lampung, Sumatra - Indonésie.

Les paysages de l'île de Sumatra ont été bouleversés par le projet de transmigration de populations de l'île de Java et le développement de plantations industrielles. Dans la région de Lampung, le paysage montre une imbrication forte entre une petite agriculture pratiquée par les transmigrants et de grandes plantations agro-industrielles de canne à sucre et de palmier à huile (Fig. 52).

Il subsiste dans cette région un type spécifique d'agriculture sur brûlis à base d'hévéa, appelé *jungle rubber* (Photo 10). Ce système, introduit à Sumatra au début du XXe siècle, représente environ 2 millions d'hectares en Indonésie, soit 70 % des surfaces d'hévéa ; il a donc une réelle importance. De fait, l'hévéa s'intègre encore dans le système traditionnel d'agriculture sur brûlis (*ladang*). Il est planté dans les parcelles de riz pluvial de coteau, puis laissé dans la jachère (*belukar*) (Fig. 53). Après 10 ans, l'hévéa devient productif et il est exploité pendant environ 30 ans, jusqu'à ce que sa productivité décline. La parcelle est alors brûlée et le cycle recommence.



Photo 10. Agriculture sur défriche – brûlis à Sumatra (source : Penot, Cirad).

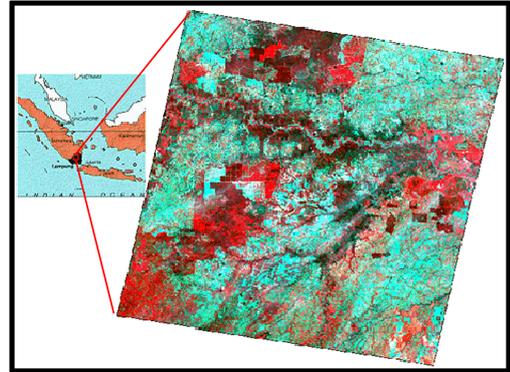


Figure 52. Image Spot de 1995 sur le site de Lampung à Sumatra (Indonésie): en rouge les plantations agro-industrielles et les reliquats de forêts, en clair les zones de culture des migrants (source : Imbernon, Cirad).

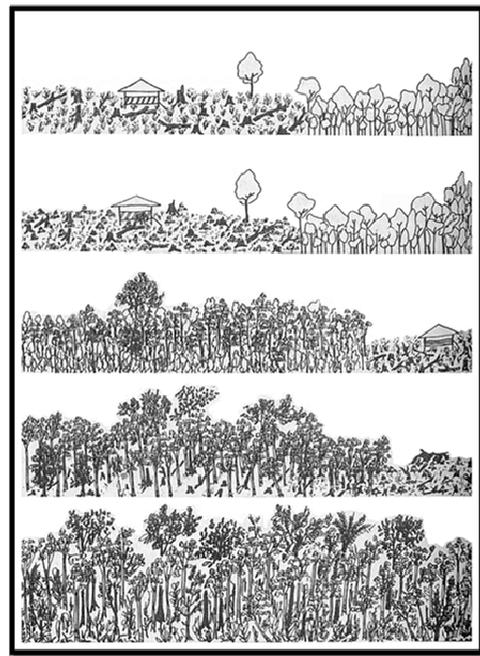


Figure 53. Le cycle du système d'agriculture sur brûlis "jungle rubber" pratiqué à Sumatra (source : Penot, Cirad).

### Pedro Peixoto et Theobroma - Brésil

Le brûlis est la technique la plus utilisée pour coloniser les espaces forestiers d'Amazonie brésilienne. Les deux sites étudiés : Pedro Peixoto dans l'Etat de l'Acre (Fig. 54) et Theobroma dans l'Etat du Rondonia (Fig. 55), sont situés sur la « frontière » de colonisation de l'espace forestier.

Les deux sites sont occupés en majorité par de petits agriculteurs qui défrichent la forêt (Photo 11) pour cultiver du riz en première année, puis du maïs et du manioc les 2 ou 3 années suivantes, avant de convertir ces parcelles en pâturages. A Pedro Peixoto, la grande majorité des terres défrichées est en pâturages, alors qu'à Theobroma la stratégie des agricul-teurs est double, avec des pâturages et des cultures annuelles.

La grande majorité de ces colons a profité d'incitations de l'Etat fédéral sous forme d'ouvertures de routes, de titres de propriété, de services publics et parfois même d'allocation de substance, dans le cadre du programme « Transamazon » (Mahar 1989)<sup>46</sup>.



Photo 11. Abattage de la forêt primaire au Rondonia (source : Imbernon, Cirad).

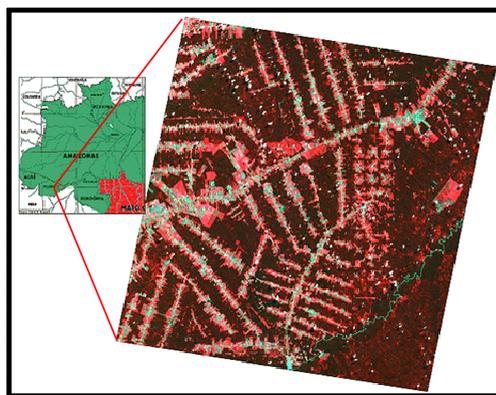


Figure 54. Image Spot de 1996 sur le site de Pedro Peixoto dans l'Acre (Brésil) : en foncé les forêts, en clair les villes et les zones de culture qui se répartissent le long du réseau routier (source : Imbernon, Cirad).

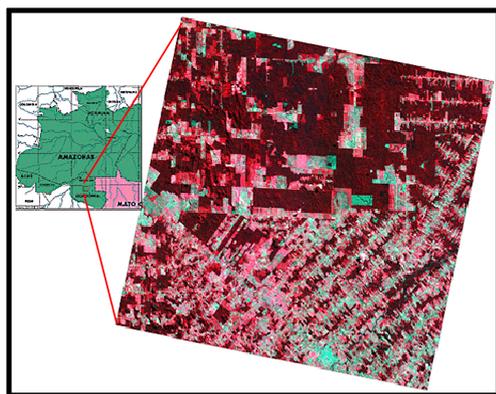


Figure 55. Image Spot de 1996 sur le site de Theobroma au Rondonia (Brésil) : en foncé les forêts, en clair les villes et les zones de culture qui se répartissent le long du réseau routier (source : Imbernon, Cirad).

<sup>46</sup> Mahar, DJ. 1989. Government policies and deforestation in Brazil's Amazon Region. World Bank, Washington D.C. 64p.

Tous ces terrains d'étude du projet ASB ont fait l'objet à un moment donné de politiques publiques favorisant la colonisation de l'espace forestier. Au Pérou, la route Pucallpa-Lima a été asphaltée pour attirer de nouveaux colons et connecter la région au marché côtier et au port de Lima. En Indonésie, le gouvernement a initié dans les années 1980 le programme de transfert de populations de l'île de Java vers l'île de Sumatra (et l'île de Kalimantan), avec la volonté d'« unifier » le pays et d'utiliser la force de travail de populations pour le développement régional<sup>47</sup>. Au sud du Cameroun, l'Etat a attribué des concessions à des sociétés d'exploitations forestières qui ont créé des pistes dans la forêt pour sortir les grumes. Ces ouvertures de pistes attirent de 'petits agriculteurs' à la recherche de terres.

### **2.3 La pression sur les hautes terres du mont Kenya**

Les terres de production agricole en Afrique de l'Est, et au Kenya en particulier, sont classées schématiquement en deux catégories : les terres arides et semi-arides, et les terres humides. Les terres humides sont situées dans les hautes terres, entre 1 200 et 3 300 m d'altitude. Elles ont un potentiel agricole élevé mais en contrepartie la densité de population et le taux de croissance démographique y sont très élevés. De plus, comparativement aux terres arides et semi-arides des zones 'basses', ces terres humides sont moins étendues et elles ne couvrent qu'une faible partie de la région. De fait, elles subissent une pression forte dont l'exutoire est actuellement les basses terres de la région.

J'ai été amené à travailler sur les évolutions d'occupation des terres et les interactions entre hautes et basses terres dans le cadre d'un projet intitulé «African Highlands Initiative» coordonné par l'ICRAF à Nairobi (Kenya). C'est sur la région de Embu au Kenya, sur les pentes du mont Homonyme, comportant des terres 'hautes' et 'basses', que j'ai analysé l'évolution de l'utilisation des terres entre 1958 et 1995 à partir de photographies aériennes et d'images satellitaires Spot.

La région d'Embu est située sur les pentes du Mont Kenya, et la végétation naturelle suit un gradient linéaire depuis des terres arides autour de 1 000 m jusqu'à des landes à 2 000 m d'altitude. Du point de vue agricole, la division agroécologique est très marquée: des cultures de thé et de café entre 1 400 et 2 000 m d'altitude, avec une pluviométrie annuelle variant entre 1 000 et 2 000 mm; du coton et des cultures vivrières entre 1 000 et 1 400m, avec environ 650 mm de pluie par an.

Pour étudier l'utilisation des terres et son évolution dans ces deux zones voisines, je disposais d'une image Spot en mode panchromatique de 1995, et d'un jeu de photos aériennes de 1985 (échelle 1 : 12 500) et de 1958 (échelle 1 : 50 000) provenant du Kenya National Survey. J'ai dans un premier temps géoréférencé l'image Spot (Fig. 56) à l'aide des cartes topographiques au 1 : 50 000 disponibles. Puis les photos aériennes sur les hautes et les basses terres de Embu ont été géoréférencées par rapport cette image Spot, avant d'être mosaïquées. La photo-interprétation de ces données a ensuite été réalisée en m'appuyant sur des observations de terrain pour l'image Spot de 1995, et sur des interviews des populations de la zone pour les photos aériennes de 1985 et 1958. La carte d'occupation des terres de cette région en 1995 a été simplifiée de manière à limiter les erreurs d'interprétation dans la comparaison avec les données plus anciennes (Fig. 57).

---

<sup>47</sup> Pain D., Benoit D., Levang P., Sevin O., 1989. *Transmigration et migration spontanées en Indonésie*. ORSTOM, Paris. 444p.

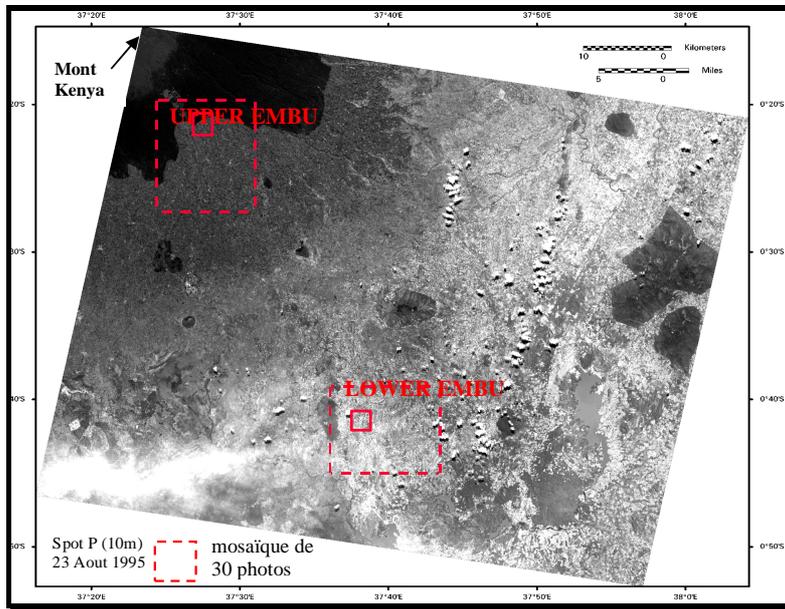


Figure 56. Image Spot de 1995 et photos aériennes de 1985 et 1958 de la région de Embu au Kenya (source : Imbernon, Cirad).

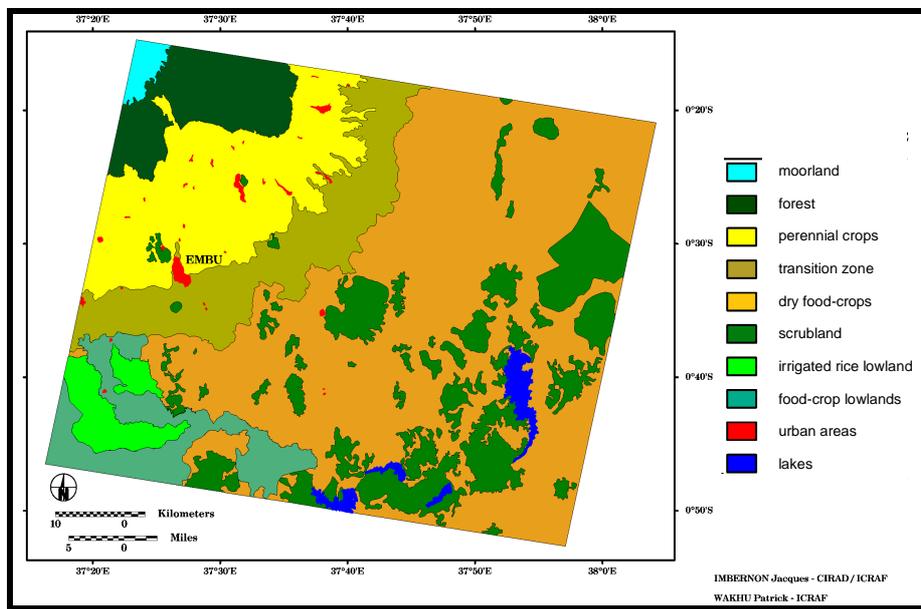


Figure 57. Occupation des terres de la région de Embu au Kenya en 1995 à partir d'une image Spot (source : Imbernon, Cirad).

L'analyse rapide de cette carte montre que tous les centres urbains sont situés dans les 'hautes terres' et que le paysage est fortement structuré par le gradient altitudinal. Les statistiques d'occupation des terres tirées de cette carte de 1995 montrent que les cultures pérennes représentaient 14 % de l'aire totale de la zone cartographiée alors que les cultures vivrières restaient prépondérantes (45 %) (Tableau 5).

	Surface (ha)	Proportion (%)
Moorland	2 566	13,94
Forest	20 998	5,84
Perennial crops zone	50 146	13,94
Transition zone	37 840	10,52
Food crops lowlands	20 699	7,97
Irrigated rice lowlands	9 732	2,70
Dry food-crops zone	160 949	44,73
Scrub	50 971	14,16
Lakes	4 586	1,76
Urban areas	1 533	0,43

Tableau 5. Occupation des terres sur les pentes sud du mont Kenya (source : Imbernon, Cirad).

### Evolution de l'occupation des terres

L'interprétation des cartes d'occupation des terres réalisées en 1958 a été difficile du fait de la mauvaise qualité des photographies anciennes : échelle au 1 : 50 000 et peu de contraste. Les photos aériennes de 1985 étaient d'excellente qualité et nous permettaient d'identifier de nombreux détails. Enfin, la faible résolution de l'image Spot (10 m) rendait difficile l'analyse des éléments de ces paysages. Malgré ces difficultés, l'analyse de ces cartes est riche d'enseignements sur l'évolution des paysages dans la région.

#### « Hautes terres » de Embu

Des espaces bâtis denses sont observables en 1958 dans le nord de la zone, mais ils n'apparaissent pas en 1985 et 1998 (Fig. 58). Cela nous a intrigués. D'après les interviews menés sur place, il s'agirait de camps de détention créés par les autorités britanniques à la fin des années 1950, lors de la révolte Mau-Mau. Ces camps ne se sont vidés qu'en 1959 à la levée de l'état d'urgence et ils ont disparu en 1963 lors de l'accession du Kenya à l'indépendance. Voilà pourquoi des espaces bâtis ont disparu. Entre 1958 et 1985, la savane arbustive ou arborée (« *bush* ») a également disparu, pour laisser place à des cultures pérennes : café et thé. D'après les « anciens » que nous avons interviewés, ce *bush* faisait partie du système traditionnel de culture itinérante. On observe aussi qu'en 1985 de nombreuses haies d'arbres sont plantées en bordure des parcelles et que le paysage est beaucoup plus fragmenté qu'en 1958 – beaucoup de parcelles ont moins de 0,5 ha. Cela semblerait traduire des processus d'intensification de l'agriculture et d'appropriation des terres. Ensuite, entre 1985 et 1995, le principal changement observé est l'extension des cultures pérennes au détriment des cultures vivrières et les statistiques d'occupation des terres entre ces 3 dates confirment cette analyse (Fig. 59).

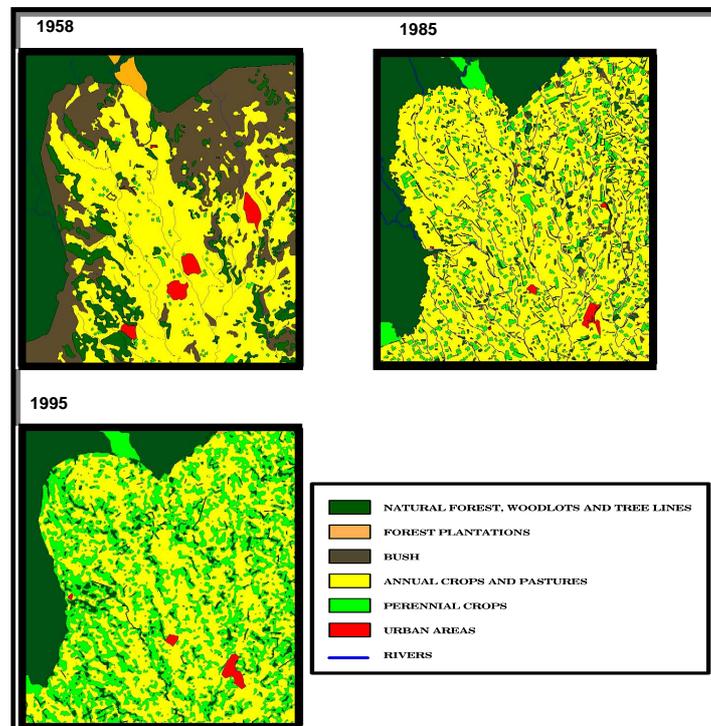


Figure 58. Occupation des terres dans les « hautes terres » de Embu (Kenya) entre 1958 et 1995 (source : Imbernon, Cirad).

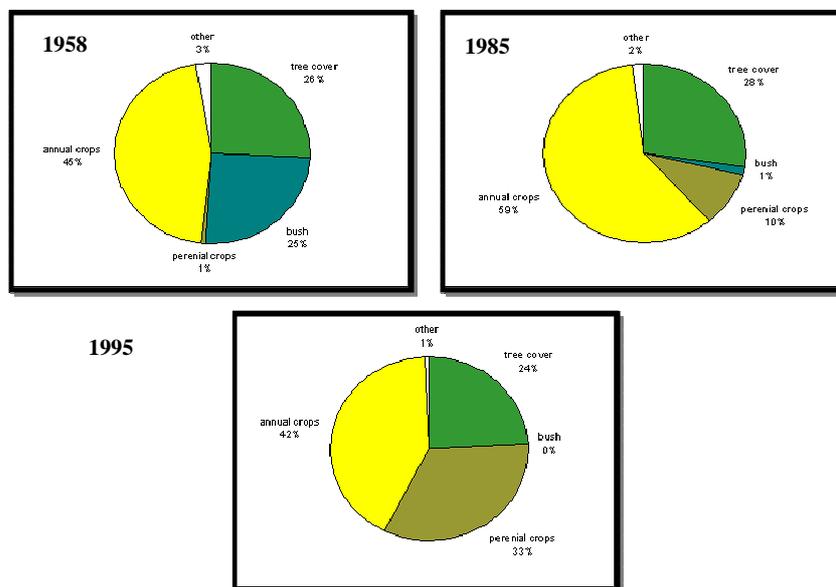


Figure 59. Statistiques d'occupation des terres dans les « hautes terres » de Embu (Kenya) en 1958, 1985 et 1995 (source : Imbernon, Cirad).

Les surfaces boisées, si l'on inclut forêts, bosquets, haies et plantations, évoluent peu entre 1958 et 1995. Toutefois, en regardant plus en détail, autant que la résolution spatiale des images satellitales le permette, on constate que entre 1958 et 1985 l'arbre apparaît dans le système agricole : sur les parcelles de culture pour former des systèmes agroforestiers à base de cultures pérennes, et surtout autour des parcelles pour former des haies (Fig. 60). Ainsi, en 1985 puis 1995, nous sommes en présence sur ces hautes-terres d'un véritable paysage bocager dont les espèces dominantes sont *Grevillea robusta* et *Eucalyptus*, des espèces exotiques.

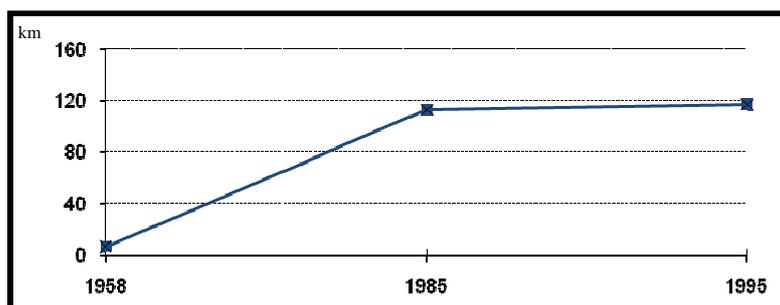


Figure 60. Evolution de la longueur de haies d'arbres autour des parcelles entre 1958 et 1995 dans les « hautes terres » de Embu (source : Imbernon, Cirad).

Enfin, les cultures pérennes, quasi inexistantes dans la zone en 1958 (moins de 1 % de la surface), n'ont pas cessé de s'étendre ensuite. Ce processus a pris une ampleur particulière entre 1985 et 1995 puisque les cultures pérennes sont passées de 10 % à 33 % des surfaces totales, au détriment des cultures vivrières. Cette formation d'un paysage bocager et ce passage à des systèmes agroforestiers avec des cultures pérennes traduisent sans aucun doute un processus d'intensification agricole et de sécurisation foncière dans les hautes terres d'Embu.

#### Evolution de l'occupation des terres dans la « basses terres » de Embu

Entre 1958 et 1985, peu de changements sont observables : le « bush » domine avec 50 % de la surface totale et la surface occupée par les cultures annuelles (41 %) change peu. L'agriculture itinérante, comme système de culture extensif, reste encore prédominante. Seule l'apparition de petites zones urbanisées est observable durant cette période (Fig. 61).

Les zones urbanisées s'étendent ensuite significativement entre 1985 et 1995. Mais durant cette période, le plus remarquable est la disparition du « bush » au profit des cultures vivrières qui passent de 41 % des surfaces totales en 1985 à 73 % en 1995. L'espace cultivé s'étend au détriment de la végétation naturelle.

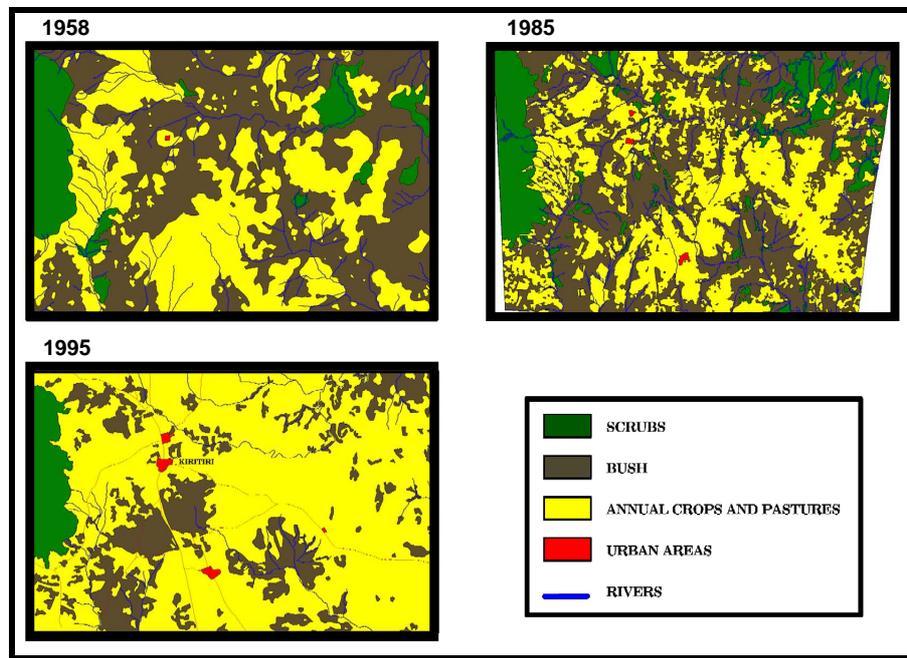


Figure 61. Changements d'occupation des terres entre 1958 and 1995 dans les « basses terres » de Embu (source : Imbernon, Cirad).

### Analyse comparative et interactions entre les territoires

Ainsi, nous voyons que les changements d'occupation des terres entre le haut et le bas de la région d'Embu sont fortement différenciés. Dans le haut, depuis 1985, peu de changements sont observables. Le potentiel agricole de ces terres a déjà été mis en valeur entre 1958 et 1985 et les possibilités de changement des systèmes agricoles très intensifs à base de culture de café et de thé sont minimes. Or la population est très dense (800 habitants/km<sup>2</sup>), l'espace est saturé et l'agriculture est orientée presque uniquement vers une économie de marché. Les effets de cette agriculture de rente très intensive se traduisent par l'emploi d'une importante main-d'œuvre salariée, mais aussi par la nécessité pour ces populations d'acheter les produits vivriers pour la consommation. Ces échanges de produits vivriers se font essentiellement avec les « basses terres » de Embu.

Car dans les basses terres, si le paysage a peu évolué entre 1958 et 1985, il a par contre évolué rapidement depuis 1985 : la surface des cultures vivrières a augmenté de plus de 75 %. De fait la végétation naturelle et les systèmes traditionnels de culture itinérante pratiqués jusqu'alors sont mis sous pression et régressent. Cette rapide évolution s'explique en grande partie par l'arrivée de populations qui viennent des terres hautes à la recherche de terres de culture disponibles. Mais les ressources naturelles de cette zone sont limitées : les pluies sont faibles et erratiques, et les sols sont pauvres et retiennent peu l'eau (ferrasols, acrisols et luvisols dans la classification anglophone). Il est donc à craindre à moyen terme que la fertilité des sols de ces basses terres d'Embu se dégrade et que rapidement ces terres ne puissent plus accueillir de nouveaux arrivants.

Nous voyons donc par cette analyse que les deux zones, terres hautes et terres basses du mont Kenya, se différencient fortement du point de vue de l'utilisation des terres, mais aussi des évolutions. L'analyse comparative met en évidence les interactions entre ces deux zones du point de vue social et économique. Les hautes terres, très intensifiées autour de cultures pérennes mais saturées du point de vue foncier, sont consommatrices de produits alimentaires et constitue une zone de départ de populations à la recherche de terres de culture. Les basses terres, faiblement peuplées, où se pratique une agriculture extensive vivrière alimentent les marchés vivriers des terres hautes et accueillent les migrants qui en sont issus. Ces deux zones sont très dépendantes l'une de l'autre, tant dans leurs échanges que dans leurs évolutions.

#### **2.4 L'impact des politiques publiques, des marchés et des migrations sur l'occupation des terres en El Salvador**

Le territoire d'El Salvador fait partie de l'isthme centroaméricain. C'est un petit pays d'environ 20 000 km<sup>2</sup> où, détaché au ministère de l'Environnement dans le cadre d'un projet régional, j'ai pu mener de nombreuses études.

L'une d'elles a porté sur l'analyse des dynamiques d'occupation des terres d'El Salvador. Elle a utilisé pour cela la carte d'occupation des terres réalisée avec des données Landsat Etm+ de 2002 à une échelle 1/50 selon la méthode Corine Land Cover adaptée à l'Amérique centrale (Imbernon, 2003), dont j'ai coordonné la réalisation dans la région. Cette carte a servi de point de référence pour remonter le temps dans l'analyse des dynamiques. Toutefois, du fait du volume important de données à traiter, j'ai limité cette étude à quelques zones qui présentaient un intérêt environnemental, social ou agricole particulier pour le pays (Fig. 62).

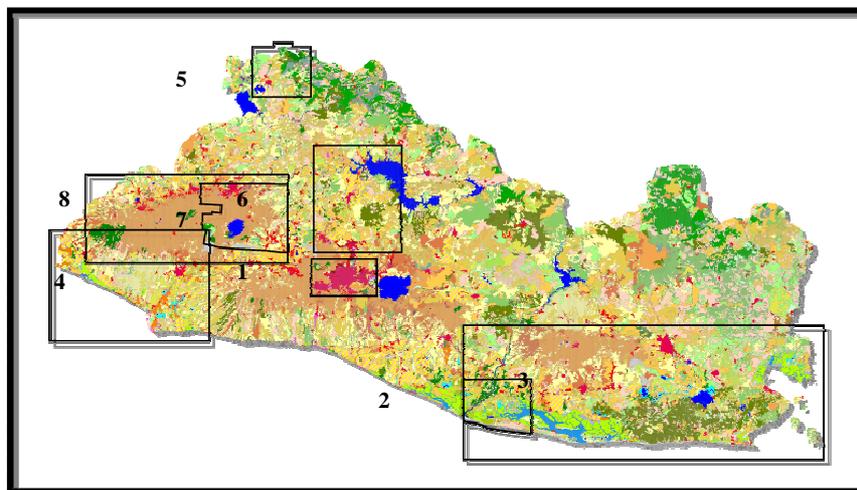


Figure 62. Localisation des 8 zones au Salvador pour l'étude des dynamiques d'occupation des terres (source : Imbernon, Cirad).

Ces zones sont les suivantes.

- Le grand San Salvador (zone 1). La croissance urbaine y est très rapide et se posent de nombreux problèmes environnementaux, sociaux et des difficultés d'adaptation des infrastructures routières et sanitaires à la forte croissance démographique.
- L'embouchure du rio Lempa (zone 2). Le rio Lempa, dont le bassin versant est trinational (Guatemala, Honduras et El Salvador), est la principale ressource en eau d'El Salvador. Avant de se jeter dans l'Océan Pacifique, il traverse une zone inondable où l'ouragan Mitch de 1998 a été dévastateur et a fait de nombreuses victimes. C'est aussi le lieu d'une réserve écologique formée de forêts humides et de mangroves.
- Le golfe de Fonseca et Jiquilisco (zone 3). Partagé par le Nicaragua, le Honduras et El Salvador, le golfe de Fonseca a la plus grande superficie de mangroves de la région. Il est l'objet d'un rapide développement économique, avec en particulier l'extension et la modernisation de la zone portuaire de La Unión. Le reste de la région constitue une importante zone agricole, avec des grains de base (maïs principalement), de l'élevage, et des plantations de palmiers, de canne à sucre et de café.
- La plaine côtière de Sonsonate (zone 4). Depuis les pentes du volcan de Santa Ana jusqu'à l'Océan Pacifique, l'agriculture de cette zone est intensive, avec des plantations de canne à sucre dans la zone côtière et des plantations de café sur les versants du volcan.
- Le Monte Cristo et Métapan (zone 5). Monte Cristo est une des aires protégées les plus grandes du pays et une des plus riches sur le plan biologique avec sa forêt sempervirente d'altitude (« *bosque nebuloso* »). Autour de la ville de Métapan, au pied de Monte Cristo, se trouvent des lagunes et des forêts sèches protégées, et une petite agriculture traditionnelle basée sur le maïs, le haricot et l'élevage.
- Le Cerro de Guazapa (zone 6). Cette montagne a été contrôlée par la guérilla durant la guerre civile. Le Cerro de Guazapa fait l'objet actuellement de plans d'aménagement touristique. La zone à l'ouest de la ville de Suchitoto, au pied du Cerro, est une importante zone de production agricole avec canne à sucre, pâturages, cultures irriguées et grains de base.
- Le volcan de Santa Ana et le lac de Coatepeque (zone 7). C'est une zone de production de café. A faible altitude (< 600 m), la zone caféière est soumise à de fortes pressions. D'une part, la ville de Santa Ana (la deuxième ville du pays) s'étend et d'autre part les agriculteurs se tournent vers la diversification agricole en raison de la crise du café de 2002-2003 et d'une faible appréciation de ces cafés de basse altitude qui sont considérés de moins bonne qualité.
- La sierra de Apaneca Llamatepec (zone 8). C'est la plus grande zone de production de café du pays. La forêt secondaire de ce système agroforestier est dense et les cafés d'altitude produits sont de grande qualité. Cette zone est vitale du point de vue économique et environnemental pour le pays.

Pour renseigner les dynamiques d'occupation des terres sur ces différentes zones, des images des satellites Landsat Etm+ de 2002 et Landsat Tm de 1993 et 1986 ont été utilisées, ainsi que des photographies aériennes à l'échelle 1:50 000 de 1949 (il s'agit de la première couverture aérienne réalisée dans le pays). Les images Landsat de 1993 et 1986 ont été géoréférencées par rapport à l'image de 2002 prise pour référence géométrique. Les photographies aériennes anciennes ont été scannées, rectifiées géométriquement par rapport à l'image de 2002, puis mosaïquées entre elles. Environ 300 photos aériennes ont été traitées et mosaïquées.

Les vérifications sur le terrain pour les cartographies réalisées avec les données de 1949, 1986 et 1993 étaient bien entendu impossibles. Aussi pour éviter autant que possible les confusions entre les thèmes cartographiés, la nomenclature de Corine Land Cover qui comportait 63 thèmes sur la carte de 2002 a été simplifiée, pour ne garder que quelques thèmes : i) forêts ; ii) agriculture (grains de base et pâturages) ; iii) café ; iv) végétation naturelle arbustive et herbeuse ; v) zones urbaines ; et vi) eaux. Ces six thèmes ont été

photo-interprétés sur les images de 1949, 1986 et 1993, mais seuls les changements observés par rapport à la carte de 2002 ont été cartographiés. De cette manière, les cartes sont parfaitement superposables et l'intersection entre les différentes dates n'entraîne pas d'artefacts liés à des imprécisions géométriques entre cartes.

### Les dynamiques contradictoires du couvert forestier, entre déforestation et reforestation

D'après le Global Forest Watch, la dégradation du couvert forestier en Amérique centrale aurait commencé il y a plus de 8 000 ans (Fig. 63) et le Salvador apparaissait déjà comme une frontière. Il est probable qu'ensuite, au moment de l'expansion Maya, la déforestation se soit étendue autour des principales cités. Une des hypothèses historiques suppose d'ailleurs que le processus de déforestation aurait été si important que certaines cités Maya auraient disparu du fait de l'épuisement des terres cultivées environnantes.

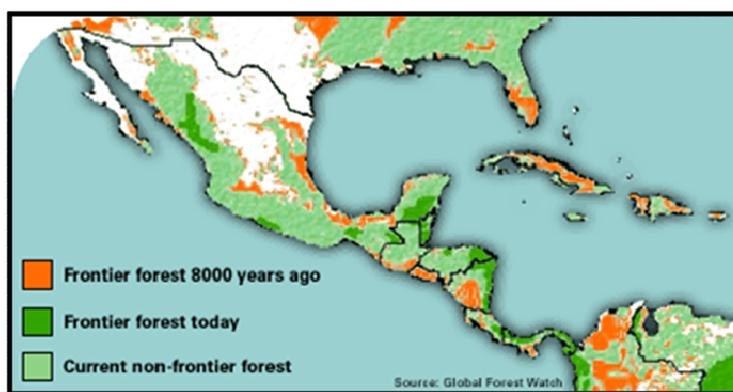


Figure 63. Les frontières avec la forêt en Amérique centrale depuis 8000 ans (source : Global Forest Watch).

Au Salvador, la déforestation s'est amplifiée au moment de la colonisation espagnole aux XVIe et XVIIe siècles avec la création de vastes latifundios ; puis au début de l'industrialisation de la fin du XIXe siècle avec l'extension de deux cultures industrielles : le coton et l'indigotier. Indigotier et coton ont disparu respectivement au milieu et à la fin du XXe siècle. C'est à cette période que la culture du café s'est développée au Salvador sous l'ombrage des forêts sur tous les massifs volcaniques. La culture du café au Salvador a eu pour effet de sauvegarder une grande partie de ces massifs forestiers du pays. Pour les quarante dernières années, il semblerait que la superficie des forêts d'El Salvador ait fortement diminué (Fig. 66). Entre les recensements agricoles de 1960 et 1971, la couverture forestière aurait diminué de 18 %. En 1994, les forêts naturelles ne représentaient plus que 80 000 ha, soit 4 % du territoire national.

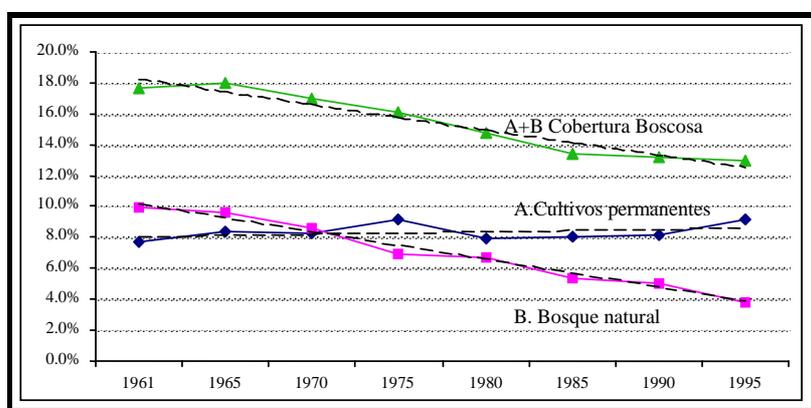


Figure 64. Evolution du couvert forestier au Salvador de 1961 à 1995 (source : MARN, El Salvador).

Les chiffres diffèrent toutefois selon les sources et de sérieux doutes entourent ces estimations qui montrent une forte diminution du couvert forestier. De plus, ces statistiques ne permettent pas de localiser les zones déforestées et de procéder à des vérifications sérieuses. En réalité, il n'était pas acquis que le processus de déforestation soit aussi important que le laissait entendre le discours officiel. Et je suspectais ce discours d'être destiné à capter des financements internationaux pour l'environnement (étant placé au ministère, je voyais la manne financière que cela représentait).

Ainsi certains arguments incitaient de plus à interroger l'existence même d'un processus de déforestation au Salvador.

- Depuis plusieurs années, le Salvador était confronté à une crise durable de l'agriculture familiale. Les prix du secteur agricole avaient été divisés par 4 entre 1970 et 2000<sup>48</sup>. Cette agriculture familiale, peu compétitive et relativement marginalisée par les politiques publiques, avait généré et continuait de générer un fort mouvement d'émigration des populations rurales à la recherche d'emplois et de services vers les villes salvadoriennes ou vers les Etats-Unis (il y aurait environ 2 millions d'immigrés salvadoriens)
- Les sols sont d'origines volcaniques et le plus souvent très fertiles, et la pluviométrie moyenne est supérieure à 1 500 mm/an. Dans des conditions aussi favorables, la capacité de régénération du couvert forestier est importante, même si cela reste difficilement quantifiable et si les données manquent.
- Enfin, l'Etat avait engagé depuis les années 1970 une politique de conservation des massifs forestiers qui, bien que peu étendue et peu encadrée par la législation, avait quand même des résultats positifs comme dans le Parc national de Monte Cristo.

#### Monte Cristo - Metapan. Extension de la forêt

Le Parc national de Monte Cristo a été la première aire naturelle protégée créée au Salvador (1976). D'une superficie initiale de 1 973 hectares, ce parc a été relativement bien protégé et il couvre actuellement environ 3 700 hectares. En 2002, la population qui vivait à l'intérieur du parc était estimée à 600 personnes. Ce chiffre

<sup>48</sup> Hecht S.B, Kandel S., Gomes I., Cuellar N. and Rosa H., 2006. *Globalization, Forest Resurgence, and Environmental Politics in El Salvador*. World Development, vol. 34, n° 2. p. 308-323.

était semble-t-il bien plus important auparavant car des relocalisations de populations ont été effectuées avec l'appui du gouvernement à la fin des années 1970.

La zone de l'étude couvre une superficie de 47 271 ha, incluant la zone du parc de Monte Cristo, les forêts qui entourent le parc, la ville de Metapan et sa périphérie qui est une zone de faible altitude dominée par une agriculture traditionnelle.

En 2002, les statistiques d'occupation des terres montrent que la moitié de la superficie est agricole (49,5 %) mais que la couverture forestière est importante (23,3 %) (Tableau 6). Cette agriculture est essentiellement composée de grains de base (maïs et haricot) et de pâturages.

<b>Eau</b>	326,7 ha	<b>0,7 %</b>
<b>Végétation naturelle</b>	3 157,7 ha	6,7 %
<b>Forêts</b>	10 996,1 ha	23,3 %
<b>Agriculture (*)</b>	23 406,2 ha	49,5 %
<b>Café</b>	264,2 ha	0,5 %
<b>Urbain et mines</b>	951,4 ha	2,0 %
<b>Autres</b>	8 168,8 ha	17,3 %

(\*) grains de base (maïs et haricot) et pâturages

Tableau 6. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Monte Cristo – Metapan (source : Imbernon, Cirad).

Les changements observés en comparant les cartes de 1949 et 2002 représentent 15,3 % de l'ensemble de la zone (Fig. 65). Ils correspondent en premier lieu à l'extension du couvert forestier (+ 5,6 %) sur des terres cultivées en 1949, tant en altitude sur le Monte Cristo (cantons de El Limo, El Rosario, et El Brujo) que dans la partie basse (cantons de El Mal Paso, la Joya, Canal Dulce et San Juan). Cette extension de la forêt est faiblement compensée par la déforestation au profit de l'agriculture (- 3,0 %) dans la partie basse de la zone à la périphérie de Metapan (cantons d'El Panal, San Juan et Montenegro).

Certaines terres en végétation arbustive et herbacée ont été reforestées (+ 2,0 % de la zone), et cette reforestation s'est faite le plus souvent avec des conifères (cantons d'El Limo, El Mal Paso, et San Miguel Ingenio). Dans la partie basse de la zone, les forêts sèches ont été dégradées et correspondent maintenant à une végétation arbustive et herbacée. Enfin, la ville de Metapan s'est étendue au détriment des forêts sèches et des végétations arbustives, et l'extraction minière à ciel ouvert s'est développée à l'ouest de la ville.

Au total, entre 1949 et 2002, les surfaces forestières de la zone ont augmenté de 1 215 ha, principalement dans la partie haute du Monte Cristo, à l'intérieur et à la périphérie de l'aire naturelle protégée (Fig. 66).

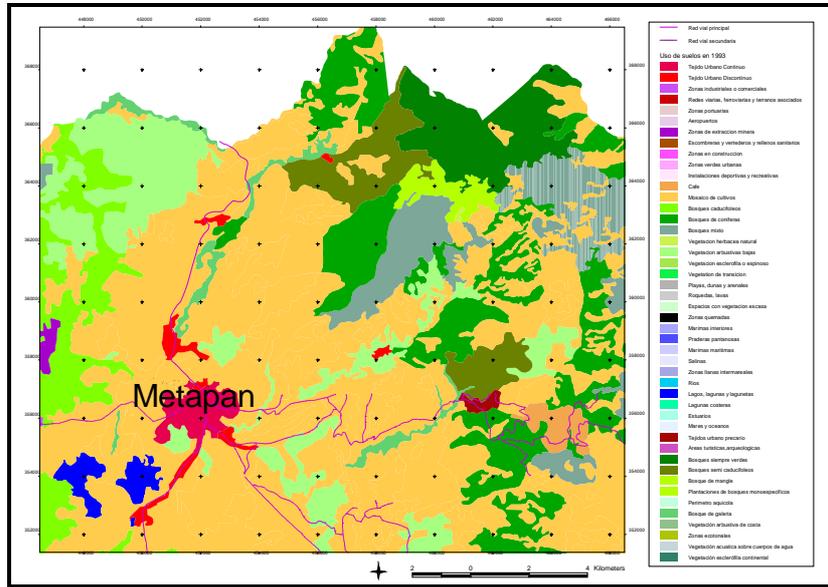


Figure 65. Occupation des terres en 2002 dans la zone Monte Cristo – Metapan (source : Imbernon, Cirad).

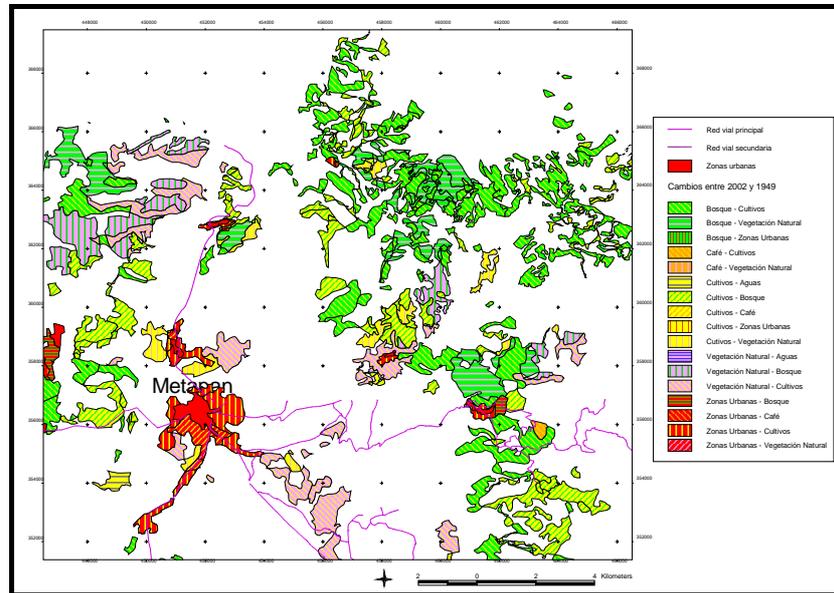


Figure 66. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone Monte Cristo – Metapan (source : Imbernon, Cirad).

Au cours de la période plus récente, de 1986 à 2002, les changements observés ne concernent que 1,2 % de la zone (dont 0,6 % entre 1993 et 2002). Ces changements se produisent à la périphérie de la ville de Metapan avec l'extension des cultures de grains de base et des pâturages au détriment de la végétation arbustive et herbacée et des forêts sèches. La ville de Metapan elle-même continue à s'étendre sur des espaces occupés par les forêts sèches et par la végétation arbustive et herbacée.

Ainsi, la dynamique des changements d'occupation des terres entre 1949 et 1986 a été beaucoup plus rapide que sur la période plus récente de 1986 à 2002 (Fig. 67). Mais ces changements ont des trajectoires très différentes selon le type d'occupation des terres. On a assisté entre 1949 et 2002 à une forte extension des forêts ; en contrepartie le domaine agricole a été réduit. Ces changements traduisent un processus de déprise agricole et de recolonisation par la forêt et le processus d'urbanisation reste faible.

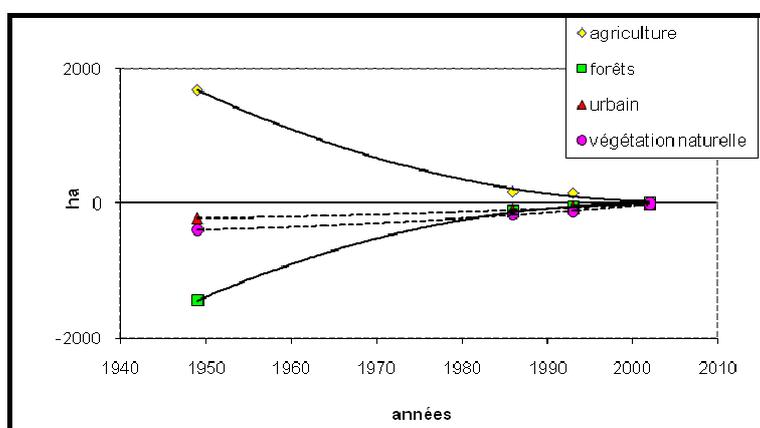


Figure 67. Evolution relative des principaux types d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone de Metapan-Monte Cristo (source : Imbernon, Cirad).

#### Mangroves du golfe de Fonseca et de Jiquilisco. Stabilité

La zone de Jiquilisco et du golfe de Fonseca abrite les plus grandes étendues de mangroves du pays. Bien qu'aucune aire naturelle protégée n'ait pour le moment été déclarée, cette zone fait l'objet d'une attention particulière du ministère de l'Environnement (MARN- El Salvador). La zone étudiée ici va de l'embouchure du rio Lempa au golfe de Fonseca; elle couvre 495 320 ha dont 31 937 ha de mangroves (Fig. 68).

En 2002, c'est une zone principalement agricole, mais avec de grandes forêts (beaucoup de mangroves littorales). Les statistiques d'occupation des terres montrent que la moitié de la superficie est agricole (51,3 %) et que la couverture forestière est importante (21,5 %) (Tableau 7). Le système agroforestier à base de café est lui-même très étendu avec 35 787,2 ha (7,2 %).

Pour étudier les changements, nous ne disposons pas des photographies aériennes anciennes sur l'ensemble de la zone; seule la période 1986-2002 a donc été considérée. Sur cette période les changements observés concernent 2,8 % de l'ensemble de la zone (Fig. 69). La déforestation au profit de l'agriculture est

significative avec 3 386 ha, dont 3 040 ha (-0,6 %) entre 1993 et 2002. Même en tenant compte du recru forestier dans certaines zones, les forêts reculent de 1 993 ha entre 1993 et 2002 ; au même moment, l'espace cultivé s'étend de 1 751 ha.

Enfin, l'abandon du café de basse altitude au profit des grains de base et des pâturages est sensible, avec une perte de 1 701 ha sur la période 1986-1993. Les interviews sur le terrain ont indiqué que ces plantations avaient été abandonnées durant la guerre civile en raison de l'insécurité qui régnait.

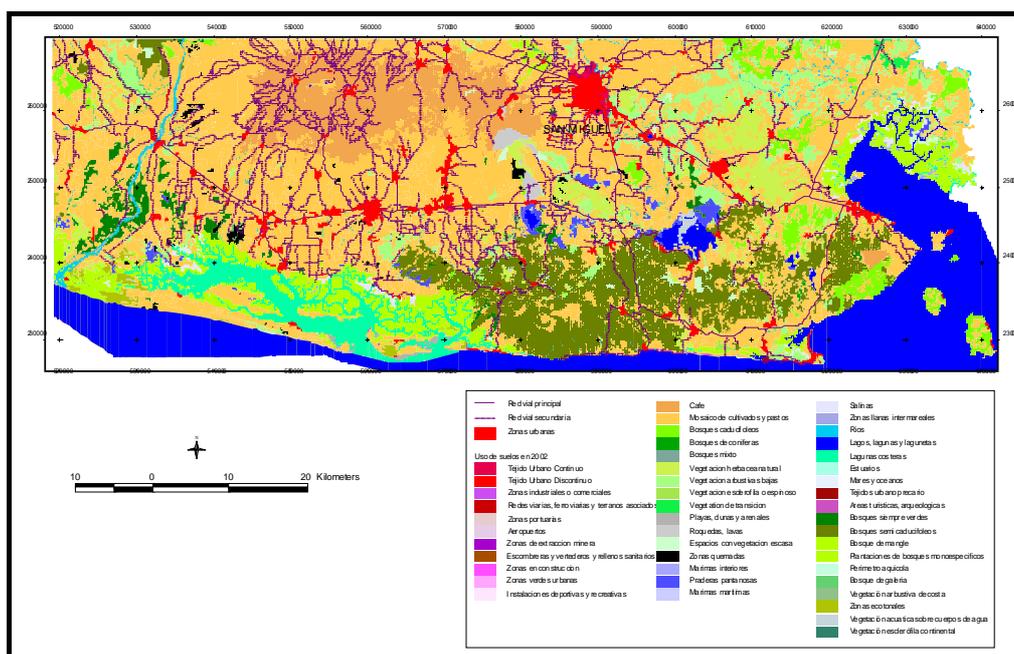


Figure 68. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Fonseca et de Jiquilisco (source : Imbernon, CIRAD).

<b>Eau (*)</b>	22 255,6 ha	<b>4,5 %</b>
<b>Végétation naturelle</b>	53 071,3 ha	10,7 %
<b>Forêts (***)</b>	106 297,1 ha	21,5 %
<b>Agriculture (**)</b>	254 125,4 ha	51,3 %
<b>Café</b>	35 787,2 ha	7,2 %
<b>Urbain</b>	12 992,9 ha	2,6 %
<b>Autres</b>	10 790,7 ha	2,2 %

(\*) hors eaux marines, (\*\*) grains de base, pâturages, plantations de palmiers et canne à sucre, (\*\*\*) y compris les mangroves

Tableau 7. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Fonseca et de Jiquilisco (source : Imbernon, Cirad).

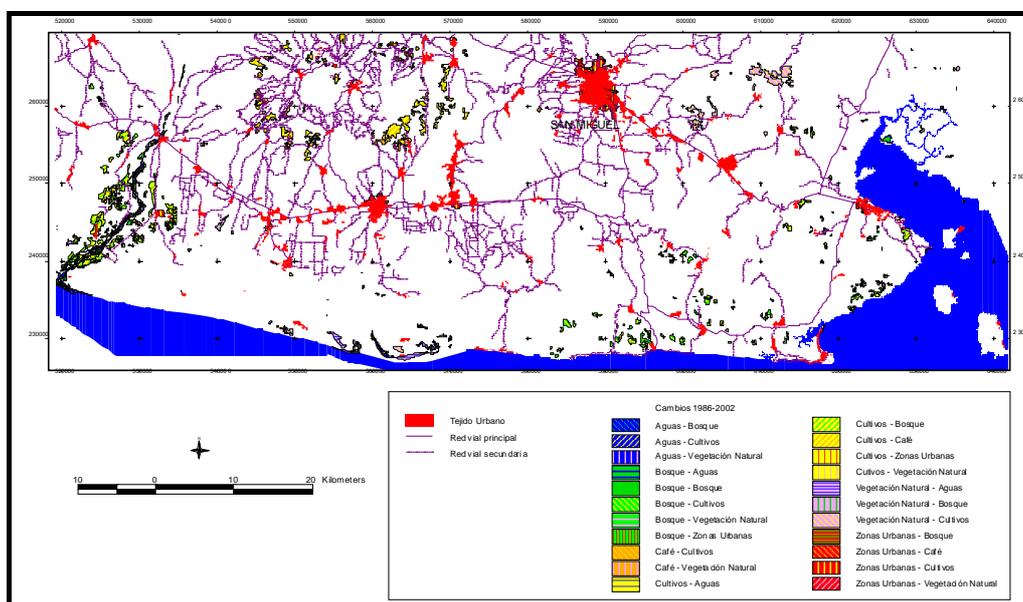


Figure 69. Changements d'occupation des terres entre 1986 et 2002 dans la zone du golfe de Fonseca et de Jiquilisco (source : Imbernon, Cirad).

### Dégradation des forêts sempervirentes du Bajo Lempa

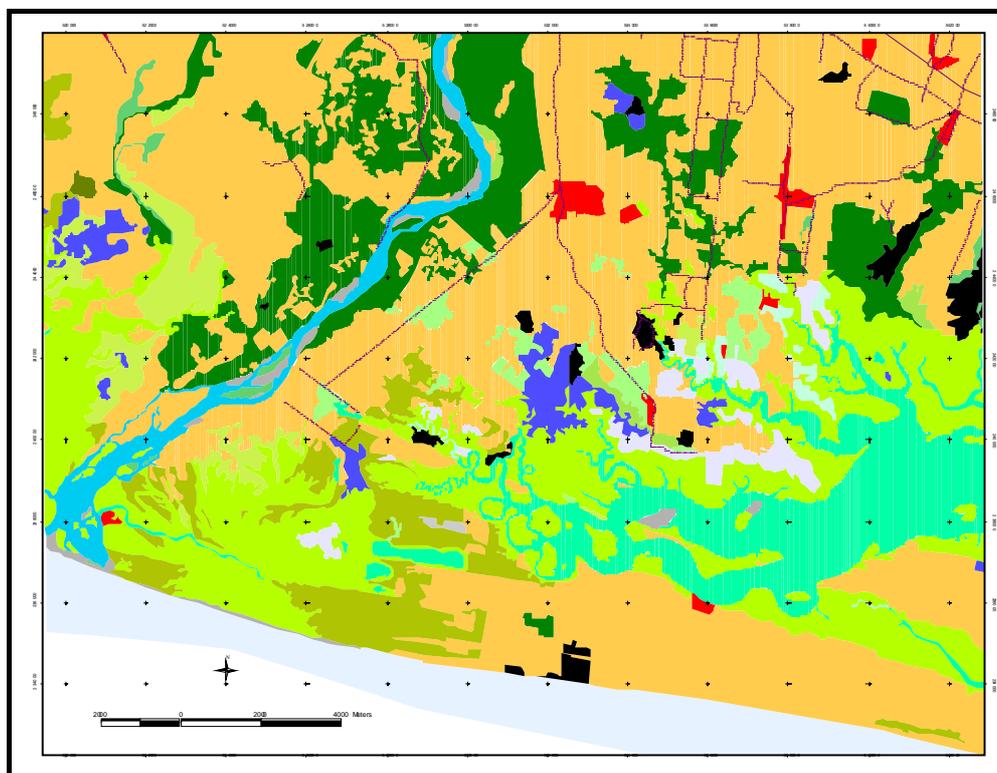
Sur cette zone peu étendue du Bajo Lempa (embouchure du rio Lempa), qui fait partie de la zone analysée précédemment, nous disposons des photos aériennes de 1949 et cela méritait de détailler l'analyse.

Cette zone a une forte croissance démographique (migrations). Le cours du rio Lempa a des modifications fréquentes (nous sommes dans la partie basse du rio qui a été soumise à des inondations catastrophiques lors de l'ouragan Mitch en 1998) et les forêts sempervirentes qui y sont présentes ont un fort intérêt écologique.

La zone cartographiée représente 38 293 ha. En 2002, elle comporte 6 596 ha de mangroves et 4 455 ha de forêts sempervirentes (Fig. 70). C'est une zone d'agriculture traditionnelle avec des grains de base et des pâturages (45 % de l'ensemble de la zone). C'est aussi une zone forestière où l'eau est très présente, et une zone faiblement urbanisée.

Les changements observés entre 1949 et 2002 sont spectaculaires (Fig. 71) : ils concernent 39,7 % de l'ensemble de la zone. Ils se traduisent en premier lieu par la réduction des forêts sempervirentes du rio Lempa, avec près de 4 700 ha convertis en cultures et 1 700 ha en végétation herbacée et arbustive (probablement d'anciennes jachères) (Fig. 79). Mais l'agriculture a également colonisé de vastes étendues de végétation naturelles le long de la côte de l'Océan Pacifique sur environ 3 400 ha, avec des plantations de palmiers à huile (entre 1949 et 1986) et des pâturages. Au total les superficies cultivées se sont étendues de 6 312 ha sur les 38 293 ha de la zone. Le cours de rio Lempa lui-même a changé, entraînant l'envahissement des terres par les eaux sur 980 ha, alors que d'anciens bras du rio Lempa ont été recolonisés par la végétation

naturelle et par les forêts sur 545 ha. Enfin des salins et des bassins d'aquaculture (crevettes) sont apparus durant cette période couvrant une superficie de 570 ha, principalement dans des zones de mangroves.



\*Voir légende des cartes précédentes

Figure 70. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Bajo Lempa (source : Imbernon, Cirad).

En 2002, cette zone est essentiellement agricole, mais elle comporte des zones humides, avec des lagunes et des mangroves. Les statistiques d'occupation des terres montrent que presque la moitié de la superficie est agricole (45,0 %) et que la couverture forestière est très importante (29,6 %) (Tableau 8).

<b>Eau (*)</b>	3 922,6 ha	<b>10,2 %</b>
<b>Végétation naturelle</b>	3 968,1 ha	10,4 %
<b>Forêts</b>	11 349,2 ha	29,6 %
<b>Agriculture (**)</b>	17 232,7 ha	45,0 %
<b>Urbain</b>	330,3 ha	0,9 %
<b>Autres</b>	1 490,1ha	3,9 %

(\*) hors eaux marines. (\*\*) grains de base, pâturages et plantations de palmiers

Tableau 8. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Bajo Lempa (source : Imbernon, Cirad).

Entre 1986 à 2002, les changements ont été particulièrement importants avec environ 9,1 % de la zone concernée, dont 7,0 % entre 1993 à 2002 seulement. Ces changements correspondent surtout à un processus de déforestation au profit de l'agriculture (2 000 ha). Cette déforestation touche surtout les forêts sempervirentes bordant le rio Lempa, et ce alors que ces forêts représentent un fort intérêt écologique, car les espèces sont rares.

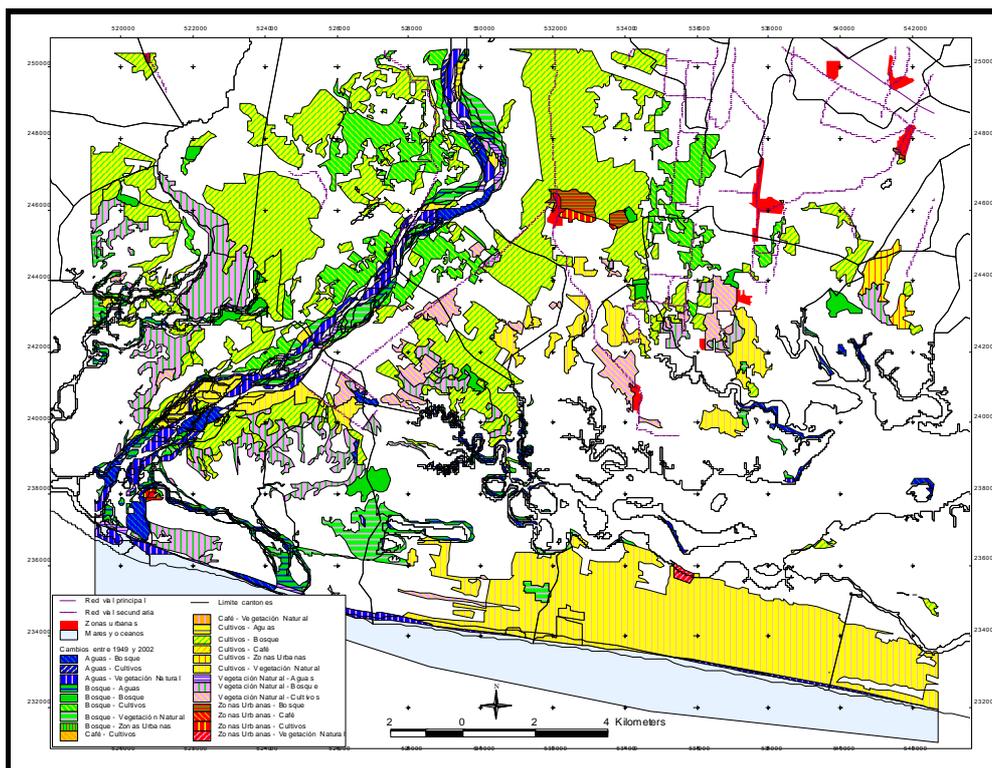


Figure 71. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du Bajo Lempa (source : Imbernon, Cirad).

### Mise en culture des zones de végétation arbustive du Cerro de Guazapa

Cette zone va du rio Lempa et du Cerron Grande au nord, à la banlieue de San Salvador au sud ; elle couvre 114 538 ha. Pendant le conflit armé des années 1980, le Cerro de Guazapa, au centre de la zone, était contrôlé par la guérilla, il fut le théâtre de nombreux combats et fut souvent bombardé. Pour notre étude sur l'évolution de l'occupation des terres, nous ne disposons pas, malheureusement, de la couverture de photographies aériennes anciennes sur cette zone.

En 2002, l'agriculture domine (67 % de la surface de la zone) avec des grains de base et des pâturages, mais aussi de grandes plantations de canne à sucre. Les forêts se situent sur les reliefs, en particulier sur le Cerro de Guazapa (Fig. 72 et Tableau 9).

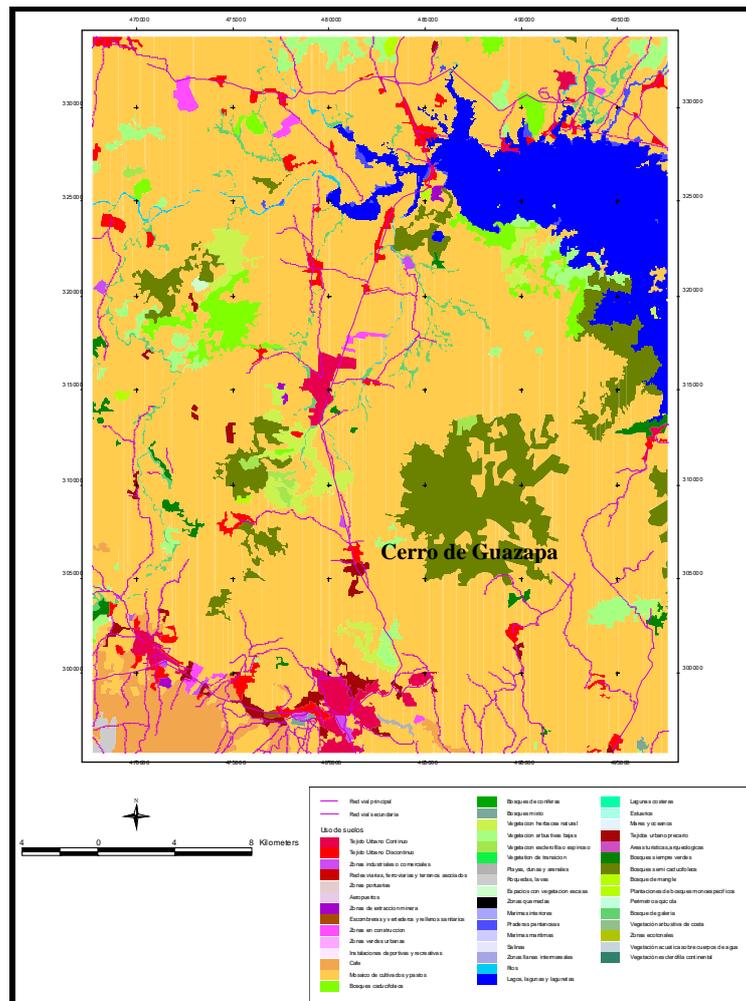


Figure 72. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa (source : Imbernon, Cirad).

<b>Eau</b>	8 711,1 ha	<b>7,6 %</b>
<b>Végétation naturelle</b>	5 456,7 ha	4,8 %
<b>Forêts</b>	13 563,4 ha	11,8 %
<b>Agriculture (*)</b>	77 710,0 ha	67,8 %
<b>Café</b>	3 116,0 ha	2,7 %
<b>Urbain</b>	5 744,1 ha	5,0 %
<b>Autres</b>	236,7 ha	0,3 %

(\*) grains de base, pâturages et plantations de canne à sucre

Tableau 9. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa (source : Imbernon, Cirad).

Les changements observés entre 1986 et 2002 représentent 2,3 % de la zone et ils concernent principalement la mise en culture de terres auparavant occupées par une végétation arbustive (Fig. 73).

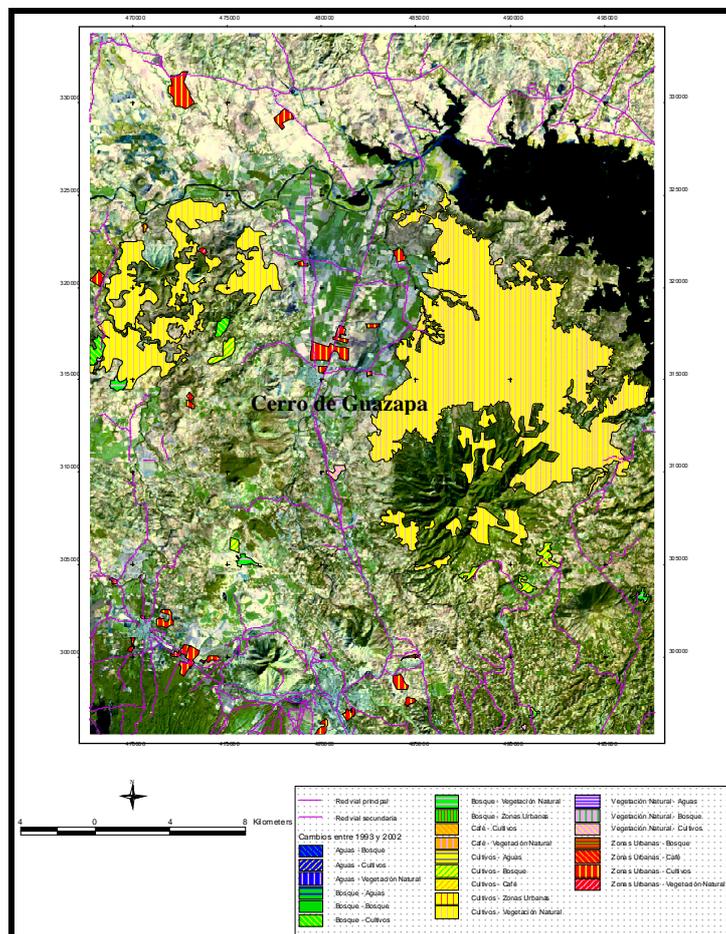


Figure 73. Changements d'occupation des terres entre 1986 et 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa (source : Imbernon, Cirad).

Sans les photos aériennes de 1949, nous ne pouvons pas connaître précisément les antécédents sur ces terres. Mais les témoignages recueillis nous ont indiqué que ces terres étaient cultivées avant la guerre civile et que la végétation arbustive observée en 1986 correspondait alors à des jachères. Ces terres auraient été abandonnées lors du conflit armé en raison de l'insécurité qui régnait, puis remises en culture après la signature des accords de paix en 1992.

La mise en culture de grandes zones de végétation arbustive ne correspondrait donc qu'à un retour des agriculteurs sur des terres abandonnées au début des années 1980. Il ne s'agirait donc pas d'un processus de déforestation comme cela était affirmé par les autorités salvadoriennes, dont le ministère de l'Environnement où je travaillais alors.

### Perceptions contradictoires des évolutions du couvert forestier

En 2002, les surfaces de forêts sur l'ensemble du pays étaient estimées par la cartographie Corine Land Cover à 284 060 ha (non compris les mangroves et les végétations arbustives), soit environ 13,8 % du territoire national. Comparées aux chiffres du ministère de l'Environnement, 10 % en 1961 et 4 % en 1995, notre estimation en 2002 est largement supérieure. Et si les forêts de mangroves (34 519 ha) sont prises en compte, les forêts en 2002 représentaient 15,5 % du territoire national.

A ces chiffres, nous pourrions ajouter les forêts secondaires qui assurent l'ombrage des plantations de café (agroforêts). En 2002, ces agroforêts représentaient 220 927 ha (10,5 % du territoire), et ces chiffres diffèrent peu de ceux du ministère de l'Environnement (MARN). En considérant toutes ces forêts, la superficie totale des forêts en 2002 était de 539 506 ha, soit 26,30 % du territoire national. Nous sommes donc très loin des estimations officielles du ministère de l'Environnement avec 4 % de forêts en 1995. El Salvador est un pays forestier, et cette idée vient en contradiction avec le discours officiel relayé par les médias sur la disparition des forêts en El Salvador.

Une des raisons de cette confusion est la diversité des situations ; cette diversité favorise les perceptions contradictoires. Sur la période de temps 1949-2002, des dynamiques très différentes peuvent être observées suivant les zones : i) une augmentation du couvert forestier sur le Monte Cristo et sur les volcans où se concentrent la production de café (San Salvador, Llamatepec-Apaneca) ; ii) une stabilité des surfaces de mangroves côtières (Jiquilisco et golfe de Fonseca) ; iii) une diminution du couvert forestier à l'embouchure du rio Lempa et autour des centres urbains (San Salvador et Santa Ana) ; et iv) une augmentation puis une diminution du couvert forestier autour de Cerro de Guazapa. C'est cette diversité des dynamiques qui brouille les perceptions sur l'évolution du couvert forestier. Consciemment ou non, c'est la perception négative qui prédomine alors qu'il n'y a aucune raison d'être pessimiste pour El Salvador, bien au contraire.

### **La montée du café en altitude**

L'histoire du café en Amérique centrale remonte au XIXe siècle, mais c'est au milieu du XXe siècle que le café s'est répandu au Salvador et a structuré le paysage agricole des chaînes volcaniques centrales. Mais, depuis 1978, les revenus du café ont décliné et le début des années 2000 a été marqué par une chute brutale des cours mondiaux. Cette crise récente a eu pour effet de segmenter le marché du café et de favoriser le marché des cafés de qualité qui sont généralement assimilés aux zones d'altitude.

Parallèlement à ces effets du marché du café, d'autres facteurs influent sur les évolutions observées. La réforme agraire des années 1990 à la suite du conflit armé a entraîné le secteur vers la multiplication de petites exploitations. Le processus d'urbanisation du pays s'est amplifié et il a accentué la pression urbaine sur les zones de production de café à basse altitude, à la périphérie des villes.

Volcan de Santa Ana et lac de Coatepeque : l'extension du café

La zone étudiée autour du lac de Coatepeque représente 66 462 ha et elle fait partie de la sierra Apaneca Llamatepec (Fig. 74). C'est la zone du café par excellence en El Salvador.

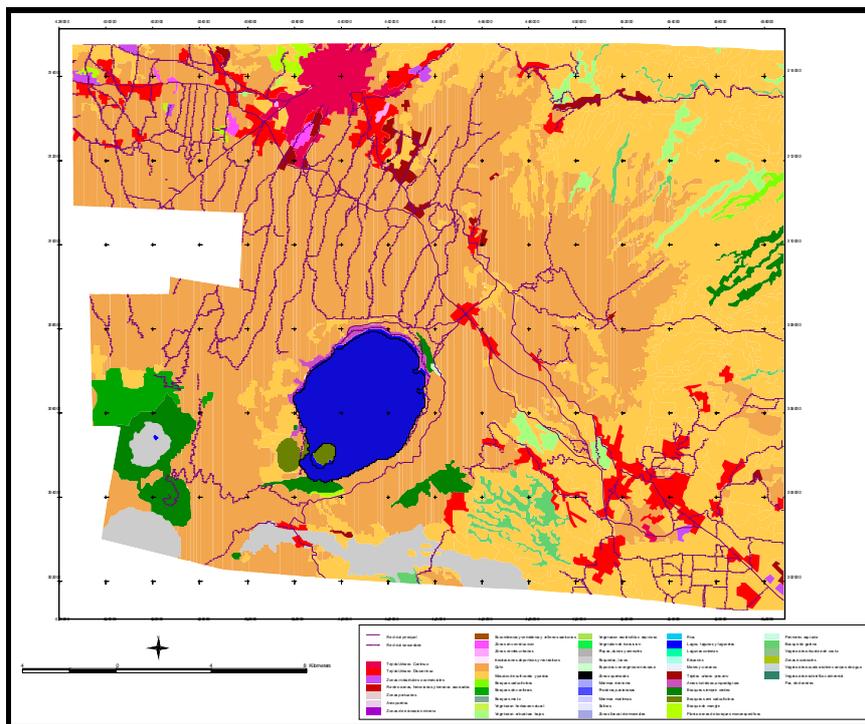


Figure 74. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Volcan de Santa Ana et du lac de Coatepeque (source : Imbernon, Cirad).

Entre 1949 et 2002, les changements observés sont très importants et couvrent 23,7 % de l'ensemble de la zone (Fig. 75). C'est l'extension de la culture du café qui constitue le changement le plus spectaculaire avec + 8 832 ha (soit + 13,3 %) au détriment des grains de base et pâturages et + 1 815 ha (+ 2,7 %) au détriment des forêts (Fig. 75). L'urbanisation sur les terres agricoles et les terres de café se développe autour de la ville de Santa Ana et des principaux bourgs avec + 2 785 ha (+ 4,2 %). Enfin, la conversion des cultures de café à basse altitude en grains de base et pâturages est significative puisqu'elle représente - 909 ha (- 1,4 %).

Au cours des périodes plus récentes, les changements ont été plus faibles et ils ne représentent que 1,6 % et 0,8 % de la surface totale sur les périodes 1986-2002 et 1993-2002 (Fig. 76). Les dynamiques qui sont

observées alors concernant principalement l'urbanisation des terres de café à basse altitude sous la pression de la ville de Santa Ana et de quelques gros bourgs, et la montée du café en altitude au détriment des grains de base et des pâturages.

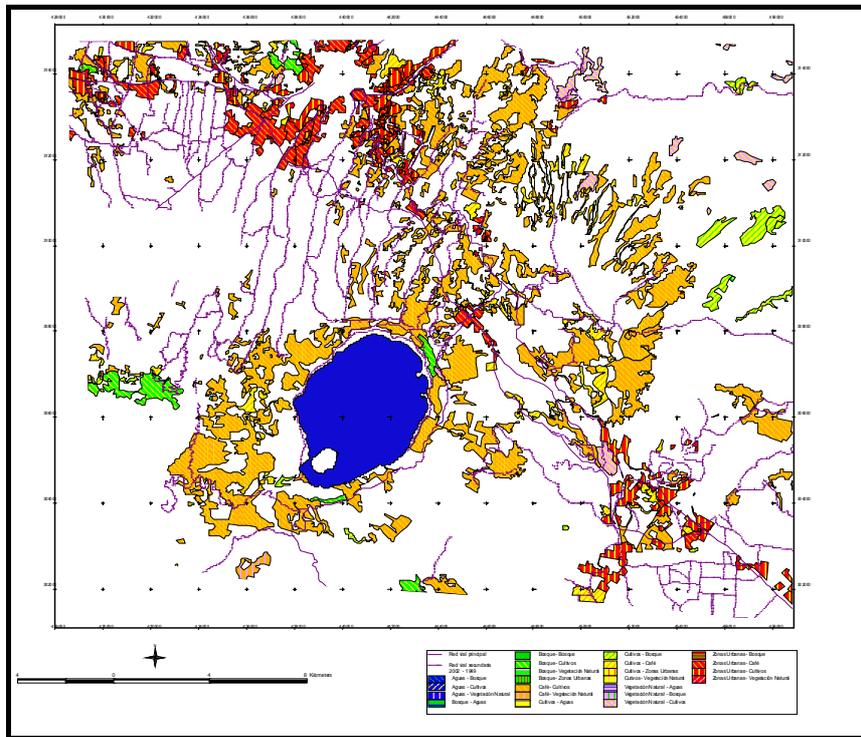


Figure 75. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du Volcan de Santa Ana et du lac de Coatepeque (source : Imbernon, Cirad).

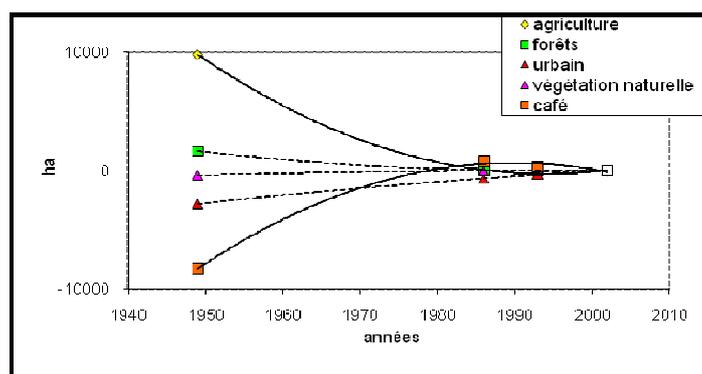


Figure 76. Conversion des principaux types d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone de Santa Ana et Coatepeque (source : Imbernon, Cirad).

Si l'on regarde plus attentivement l'extension des plantations de café suivant le gradient altitudinal entre 1949 et 2002, les plus fortes dynamiques sont observées entre 600 m et 1 000 m d'altitude. Au-delà de 1 000 m d'altitude, les dynamiques sont plus faibles. Mais le café s'est étendu à tous les étages altitudinaux pendant cette période au détriment des grains de base et des pâturages (Fig. 77).

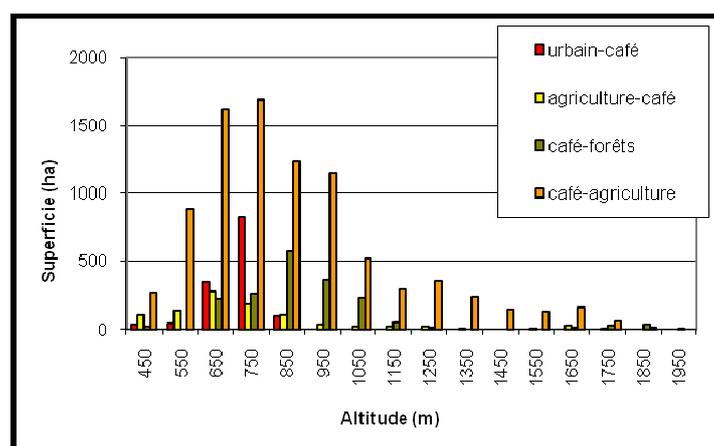


Figure 77. Conversion des terres entre 2002 et 1949 en fonction de l'altitude dans la zone de Santa Ana et Coatepeque (source : Imbernon, Cirad).

### Volcan de San Salvador : la pression urbaine

Le volcan de San Salvador domine la capitale homonyme. La zone représente 45 646 ha, du volcan de San Salvador au lac d'Ilopango à l'ouest, en bordant la sierra del Balsamo au sud (Fig. 78). Cette zone est fortement urbanisée (32,7 %), puisqu'elle comprend la capitale du pays et c'est aussi une importante zone de production de café sur le volcan de San Salvador et sur la sierra del Balsamo (25,2 %).

Les changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans cette région sont spectaculaires, ils touchent 42,9 % de l'ensemble de la zone (Fig. 79). Les dynamiques les plus importantes concernent la croissance de la ville de San Salvador (le 'grand San Salvador') sur les terres de café de basse altitude entre 500 m à 800 m, et la montée en altitude du café sur le volcan de San Salvador, au-delà de 800 m, au détriment des grains de base et des pâturages.

Les dernières années, entre 1995 et 2002, les dynamiques ont toutefois été plus faibles (4,5 % de la surface totale) et elles ne concernent que l'urbanisation sur les terres occupées précédemment par le café (934 ha, soit 2,1 %), les grains de base (671 ha, soit 1,5 %) et la végétation arbustive et herbacée (445 ha, soit 0,9 %).

L'expansion de la ville de San Salvador a donc exercé depuis 1949 une pression spectaculaire sur les terres agricoles de la périphérie de la ville et elle a repoussé la culture du café en altitude sur les pentes du volcan de San Salvador.



### L'expansion des centres urbains

Le processus d'urbanisation est très visible en El Salvador. C'est dans la capitale San Salvador que ce processus est, bien sûr, le plus spectaculaire, mais il touche également les villes moyennes que sont Santa Ana, San Miguel et Metapan (Fig. 80).

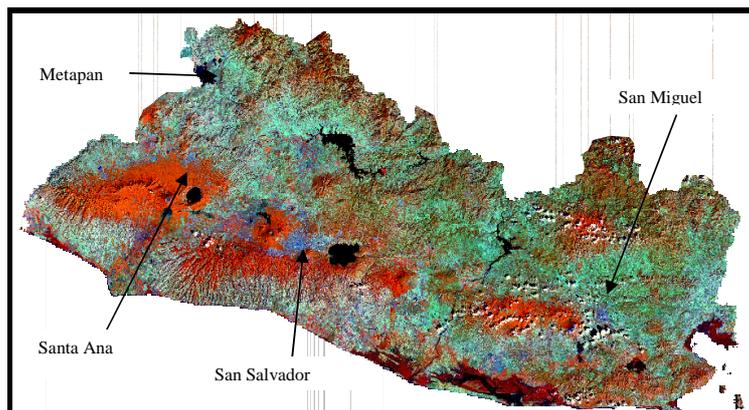


Figure 80. Localisation des centres urbains d'El Salvador (source : Imbernon, Cirad).

### Le Grand San Salvador

Entre 1949 et 2002, l'extension du bâti du « grand San Salvador » correspond à 12 691 ha, soit 27,8 % de l'ensemble de la zone étudiée. Cette croissance a été particulièrement spectaculaire entre 1949 et 1986 (Fig. 81) : villages et petites villes périphériques ont alors été agglomérés à la ville de San Salvador elle-même, comme la petite ville de Santa Tecla située à l'ouest de la capitale.

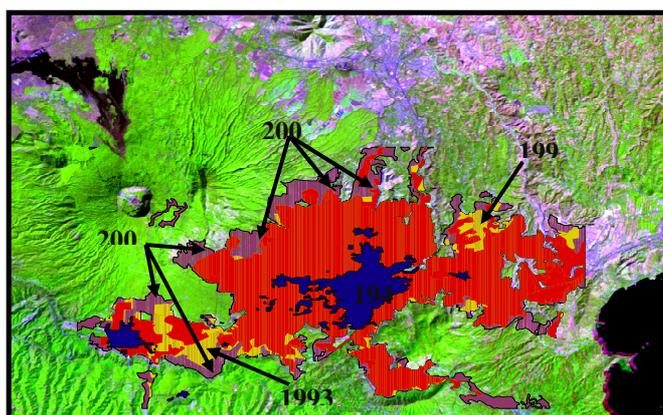


Figure 81. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du « Grand San Salvador » (source : Imbernon, Cirad).

Pour tenir compte de ce processus d'agglomération, le noyau urbain continu de la ville de l'agglomération que constituent la ville et les communes environnantes a été différencié. La surface du noyau urbain continu de San Salvador a doublé entre 1949 (5 062 ha) et 1986 (10 520 ha), et elle a triplé entre 1949 et 2002 (14 539 ha) (Fig. 81). Le taux d'accroissement urbain moyen est de 2,0 % par an ; mais ce taux a atteint 4,5 % par an entre 1986 et 1993, période qui correspond à la guerre civile : les populations rurales fuyaient alors les combats et venaient se réfugier en ville. Ce taux n'a été ensuite que de 0,2 % par an entre 1993 et 2002.

### Les autres centres urbains

#### *- La ville de Metapan*

L'emprise du tissu urbain continu de Metapan a été multipliée par 3,8 entre 1949 (93 ha) et 1986 (356 ha), et par 4,7 entre 1949 et 2002 (435 ha). La croissance annuelle a été forte entre 1949 et 1986 (3,7 % par an), puis a ralenti entre 1986 et 1993 (2,5 %) et entre 1993 et 2002 (0,3 %). Le tissu urbain discontinu, à la périphérie de la ville, s'est lui-même étendu entre 1949 et 1986, principalement le long de l'axe routier qui mène à la frontière du Guatemala. Ce tissu urbain discontinu représentait 31 % de l'agglomération en 2002. La ville de Metapan a donc eu une croissance très forte jusqu'en 1993, avec des périphéries qui se sont fortement étendues. Depuis 1993, cette ville s'étend peu, traduisant ainsi une faible attractivité.

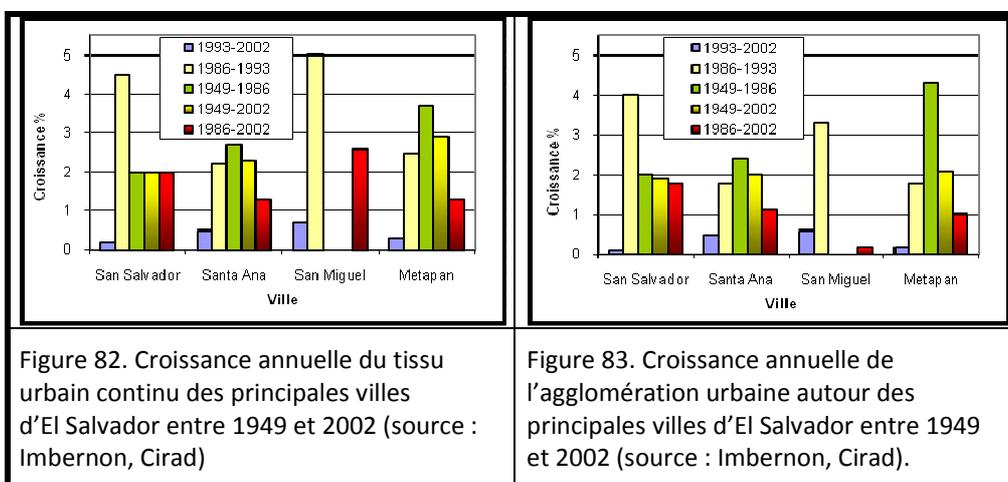
#### *- La ville de San Miguel*

L'emprise du tissu urbain continu de San Miguel a été multipliée par 1,32 entre 1986 (1672 ha) et 2002 (2 513 ha). La croissance annuelle n'a cessé de ralentir depuis 1986, passant de 5,0 % entre 1986 et 1993, à seulement 0,7 % entre 1993 et 2002. A la périphérie de la ville, le tissu urbain discontinu le long des axes routiers représente 25 % de l'agglomération.

#### *- La ville de Santa Ana*

L'emprise du tissu urbain continu de Santa Ana a été multipliée par 2,7 entre 1949 (697 ha) et 1986 (1883 ha), et par 3,3 entre 1949 et 2002 (2303 ha). Pour cette ville aussi la croissance annuelle n'a cessé de diminuer depuis 1949 passant de 2,7 % entre 1949 et 1986, à 2,2 % entre 1986 et 1993 et seulement 0,5 % entre 1993 et 2002. L'agglomération est compacte, et le tissu urbain discontinu de la périphérie ne représente que 7,2 % de l'agglomération.

Des différences sont notables dans l'évolution de ces centres urbains (Fig. 82 et 83). Ainsi, entre 1949 et 1986, Metapan et Santa Ana ont le taux de croissance le plus élevé, et ce sont alors des villes attractives. Puis ce sont les villes de San Miguel et San Salvador qui ont le taux de croissance le plus fort et sont les plus dynamiques entre 1986 et 2002.



### L'évolution démographique des centres urbains

Les recensements de population de l'année 2000<sup>49</sup> montrent que la population totale de ces 4 villes: San Salvador, Metapan, San Miguel et Santa Ana, représentait environ 2 300 000 habitants, soit 37 % de la population totale du pays.

Entre 1971 et 2000, l'extension de ces centres urbains a polarisé la population d'El Salvador. Le Grand San Salvador en particulier a eu une forte attractivité puisque sa population a été multipliée par 2,5 en 30 ans (Tableau 10).

	Année ou période	Metapan	Santa Ana	San Miguel	San Salvador
<b>Population (habitants)</b>	1971	41 098	160 382	120 640	673 224
	1992	49 950	210 970	191 116	1 361 443
	2000	57 269	248 963	239 038	1 755 031
<b>Accroissement total (%)</b>	1992-2000	14,65	18,01	25,07	28,91
	1971-2000	33,35	55,23	98,14	160,69
<b>Accroissement annuel (%)</b>	1992-2000	1,72	2,09	2,84	3,22
	1971-2000	1,15	1,53	2,39	3,36

Tableau 10. Evolution démographique des principales villes du Salvador (source : Digestyc).

<sup>49</sup> Dirección General de Estadística y Censos (DIGESTYC), El Salvador.

Les taux d'accroissement annuels de la population et du bâti (Tableau 11) traduisent cette attractivité, mais mettent aussi en évidence des différences démographiques entre les villes. Dans l'agglomération de San Salvador, et dans une moindre mesure dans la ville de San Miguel, la croissance relative de la population urbaine est plus forte que celle de la surface du bâti. La densité démographique de ces deux villes semble donc augmenter et le tissu urbain se densifie. Dans la ville de Metapan, et dans une moindre mesure celle de Santa Ana, la croissance démographique de la population urbaine est plus faible que la croissance de l'emprise de la ville. Dans une certaine mesure se produit ici une déprise urbaine des centres-ville. De plus, pour ces deux villes, la croissance démographique annuelle entre 1971 et 2000 reste faible (1,15 % et 1,53 %), bien inférieure au taux national qui est de 1,7 % par an.

	Taux de croissance démographique annuels entre 1971 à 2000	Taux de croissance annuels du bâti entre 1949 et 2002
<b>San Salvador**</b>	3,36 %	1,91 %
<b>Santa Ana</b>	1,53 %	2,01 %
<b>San Miguel</b>	2,39 %	1,74 %*
<b>Metapan</b>	1,15 %	2,95 %

\* l'extension de la ville n'est ici calculée qu'entre 1986 et 2002 \*\* agglomération de San Salvador

Tableau 11. Croissance démographique annuelle et expansion annuelle des principales villes du Salvador (source : Imbernon, Cirad).

Sans doute, la migration des populations rurales vers les villes est bien réelle. Entre les deux recensements nationaux de 1971 et 1992, le taux d'accroissement annuel de la population urbaine et rurale est respectivement de 1,98 % et 0,54 %, pour un taux d'accroissement annuel de la population totale de 1,18 %. Les raisons de ces mouvements de population vers les villes sont toujours les mêmes : pauvreté et manque de travail en zones rurales, et attractivité des services dans les centres urbains. Cet exode rural a été renforcé dans le cas d'El Salvador par la guerre civile durant la période 1971-1992.

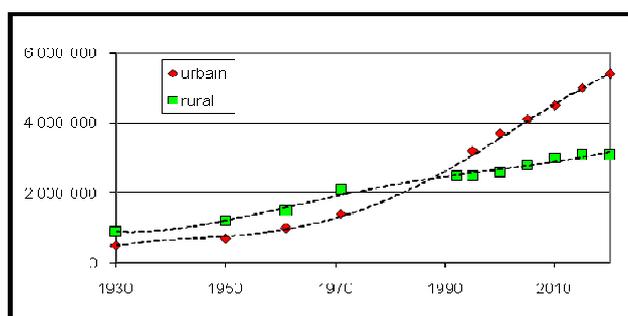


Figure 84. Evolution de la population urbaine et rurale entre 1930 et 2020 en El Salvador (source : DIGESTYC, El Salvador).

Sur une échelle de temps plus long, l'évolution des populations totales, urbaines et rurales, au niveau national, depuis 1930, montre que le processus d'urbanisation a commencé dans les années 1950 (Fig. 84), bien avant le conflit armé. Comparé à l'évolution des villes des continents africain et asiatique, le phénomène d'urbanisation est plus ancien. Mais, sans doute, le phénomène s'est accéléré pendant les 30 dernières années. Les projections de la DIGESTYC indiquent d'ailleurs que la population urbaine en 2020 devrait représenter 63 % de la population totale du pays. Une telle concentration de population dans les villes présente d'ores et déjà de nombreux risques pour les équilibres sociaux, économiques et environnementaux.

### **Quelques facteurs explicatifs des dynamiques observées**

Aucun des processus observés en El Salvador, déforestation ou reforestation, montée du café en altitude, expansion des centres urbains, n'apparaît sur les 50 dernières années comme un processus linéaire. Or, et on ne peut que le déplorer dans ce genre d'étude, la fréquence des observations n'est pas suffisante pour identifier les éventuels effets de seuil et discriminer les facteurs explicatifs qui sous-tendent ces dynamiques.

Le pays a subi de profondes tensions économiques, politiques, culturelles et sociales durant ces dernières décennies. Sur le plan économique en particulier, l'affaiblissement du secteur agricole traditionnel basé sur une « petite agriculture familiale » cultivant le maïs et le haricot, et l'apparition de nouvelles structures productives basées sur l'activité commerciale et les services, et soutenues en grande partie par l'entrée massive de capitaux provenant des expatriés aux Etats-Unis (les fameuses « remesas »), ont profondément modifié la société salvadorienne. Après le conflit désastreux des années 1980, le pays a connu un boom économique dont les effets se sont surtout fait sentir dans les zones urbaines.

De nombreux facteurs ont joué dans l'évolution de l'occupation des terres de ce pays entre 1949 et 2002. Mais les principaux facteurs sont probablement les politiques publiques mises en œuvre, la guerre civile, l'accessibilité des terres et l'évolution des marchés des produits agricoles.

#### Les politiques publiques

Il est possible de différencier les politiques sociales et territoriales, les politiques environnementales, les politiques économiques et enfin les politiques spécifiques à l'agriculture.

- *Politiques sociales et territoriales.* Les déséquilibres territoriaux d'El Salvador se manifestent par des niveaux de croissance et de développement différents entre les régions. Ainsi de grands segments de la population rurale n'ont pas accès à des services sociaux. Par exemple, l'accès à l'eau potable y est 4,5 fois moindre dans le département de Morazan qu'à San Salvador, la capitale du pays. Des progrès ont été accomplis ces dernières années avec la mise en œuvre de politiques de décentralisation et la création d'espaces de participation comme le Grupo Consultativo avec lequel a été élaborée ces dernières années la stratégie nationale de développement local.

- *Politiques environnementales.* Dans la zone de Monte Cristo, la protection de l'aire naturelle protégée a eu un effet positif sur la protection du couvert forestier et sur la régénération forestière. A cela, il faut ajouter une politique volontariste dans les années 1970 de replantation dans et autour du parc de cyprès mexicains (*Cupressus lusitanica*) sur une superficie d'environ 300 hectares, et de pins ocote (*Pinus oocarpa*) et caribéens (*Pinus caribbea*) sur plus de 100 hectares. Trente ans plus tard, ces plantations se sont étendues

naturellement et ces espèces couvrent une grande partie des versants du Monte Cristo, en dessous de 2 000 m d'altitude.

• *Politiques économiques et agricoles.* L'affaiblissement des agricultures familiales est une tendance indéniable, et cette tendance est renforcée par l'ouverture au libre échange. Dans les années 1970, les exportations agricoles représentaient 81 % des échanges extérieurs du pays ; en 2000 cette proportion est de 11 %. Les 2/3 des échanges extérieurs proviennent des « remesas familiares » (argent envoyé des Etats-Unis par les émigrés à leur famille) et environ 17 % des 'maquillas', des entreprises étrangères de confection ou de petite électronique, établies en zones franches, et consommatrices de beaucoup main-d'œuvre à faible coût. Le Traité de libre commerce (TLC) signé avec les Etats-Unis en 2005 va certainement affaiblir encore les agricultures familiales d'El Salvador en concurrençant les cultures vivrières produites localement, en particulier le maïs, par des importations en provenance des Etats-Unis. Cette politique économique et agricole aggrave la paupérisation des exploitations familiales vivrières et augmente les flux de migration des populations rurales vers les centres urbains.

#### *Guerre civile et accords de paix*

Lors du conflit armé, le territoire national a éclaté, avec des zones sous contrôle gouvernemental et d'autres sous contrôle de la guérilla. Dans certaines zones où le conflit a été intense, l'insécurité a poussé des populations à abandonner leur terre et leur village. Cet exode rural s'est traduit par une déprise agricole dans des zones rurales et une augmentation des populations urbaines marginalisées à la périphérie des centres urbains. Mais si les événements de cette période de guerre civile ont fortement marqué les paysages salvadoriens, les traces en ont été vite effacées. L'espace a été réapproprié et les terres abandonnées lors du conflit ont été remises en culture.

De plus, les accords de paix de 1992 ont permis la mise en place d'un programme de transfert de terres qui a concerné 36 000 bénéficiaires, principalement d'ex-combattants, pour 106 000 hectares redistribués. Toutefois, la superficie moyenne de ces attributions de terre par bénéficiaire est de seulement 3 ha, largement en dessous des 12 hectares estimés par la Banque mondiale pour maintenir une famille rurale au dessus du seuil de pauvreté dans ce pays. De fait, en 2002, beaucoup de ces attributaires avaient revendu leur terre et un processus de concentration de la terre entre les mains de certains riches propriétaires ruraux, mais aussi urbains semblait avoir eu lieu<sup>50</sup>.

#### *Contraintes biophysiques et accessibilité des territoires*

Les zones frontalières avec le Honduras, au nord-est du pays, sont à la fois montagneuses et relativement éloignées de la capitale. De fait, elles sont peu accessibles et elles restent marginalisées par rapport au reste du territoire national et aux marchés. La pression démographique y est relativement faible et les pratiques agricoles sur les pentes de ces montagnes restent traditionnelles : on y trouve encore une agriculture itinérante.

A l'opposé, la zone du « bajo Lempa » et les zones côtières de mangroves, au sud-ouest du pays, sont facilement accessibles par le réseau routier. Le Bajo Lempa a été colonisé dans les années 1980-1990. Ces terres sont cependant soumises à de forts risques d'inondation et l'ouragan Mitch de 1998 a fait de nombreuses victimes et d'importants dégâts. Les mangroves ont jusqu'à présent été relativement préservées,

<sup>50</sup> Ce fait est largement dénoncé dans la population, mais aucune étude n'a jusqu'à présent été réalisée.

car les sols ont de fortes contraintes : ils sont lourds et salés. Des familles d'agriculteurs s'y sont installées, mais leur nombre reste marginal et elles vivent là dans des conditions précaires et insalubres. Ces zones de mangroves sous la pression d'institutions internationales font actuellement l'objet de beaucoup d'attention de la part des pouvoirs publics, et il est probable qu'elles seront protégées dans les années qui viennent.

### Evolution du marché du café

La bonne tenue des prix du café jusqu'à la fin des années 1990 a entraîné une extension des superficies plantées en café au détriment de l'agriculture vivrière traditionnelle. Mais la baisse des prix du café sur le marché mondial du début des années 2000 a entraîné un mouvement de reconversion des terres, en particulier à proximité des villes où l'extension urbaine a créé une forte spéculation foncière. Cette reconversion des terres de café a entraîné la suppression d'emplois pour des travailleurs agricoles saisonniers (eux-mêmes souvent petits agriculteurs). Au plus bas du marché du café, en 2001 et 2002, certains propriétaires n'avaient même pas récolté ; d'autres proposaient la moitié des salaires des années antérieures. Cette crise a fortement impacté les agriculteurs salariés et les petits propriétaires.

L'effondrement du marché du café à cette période a aussi entraîné la segmentation des cafés et la recherche de cafés de qualité. Cela s'est traduit par la montée de la culture du café en altitude et l'abandon des terres 'basses' de café (café de 'bajío'). Ce phénomène de montée du café en altitude a cependant atteint une limite, car il n'y a plus de terres disponibles à moins de 1 500 mètres d'altitude, altitude limite jusqu'à laquelle peut être cultivé le café à cette latitude. La culture du café s'est donc adaptée à la crise des marchés mondiaux. Et son positionnement actuel dans les zones d'altitude protège la culture du café de toute autre concurrence dans l'usage des terres. Sauf nouvelle dégradation très forte des conditions de marché, il est probable que peu de changements seront observés sur cette culture dans les années à venir.

### Principales tendances dans l'occupation des terres en El Salvador

Cette étude sur la dynamique de l'occupation des terres en El Salvador depuis 40 ans permet d'identifier des tendances fortes et de les mettre en relation avec des causes sociales, économiques et environnementales. En premier lieu, l'urbanisation apparaît comme une tendance majeure dans la dynamique d'occupation des terres. Facilement identifiable sur les cartes réalisées à partir d'images satellitaires et de photographies aériennes, cette tendance est confirmée par l'analyse des données des recensements démographiques. Bien entendu, elle n'est pas particulière à El Salvador, car elle est présente dans tous les pays du Sud. Mais elle est ici particulièrement forte et bien plus précoce que celle observée en Afrique ou même en Asie (j'aurai l'occasion de revenir sur ce point dans mon projet de recherche).

Ensuite, c'est la culture du café, principale culture pour l'économie d'El Salvador, qui a montré une rapide adaptation à la crise des marchés mondiaux avec une montée en altitude pour améliorer la qualité. Il est probable que nous sommes arrivés à présent à un seuil altitudinal au-delà duquel le café ne pourra plus monter et que la situation évolue peu dans les années à venir.

Enfin, l'évolution des forêts d'El Salvador est apparue très différente des discours des institutions gouvernementales qui déplorent la déforestation du pays. Cette étude montre en effet que, dans le principal massif forestier, celui de Monte Cristo, la forêt s'est étendue et que le couvert forestier en 2002 y est beaucoup plus important qu'en 1949. Ce résultat est d'ailleurs valable semble-t-il au niveau national. Dans les prochaines années, avec d'une part, les politiques de protection mises en place et d'autre part

l'affaiblissement de l'agriculture vivrière traditionnelle sur les versants des reliefs, les forêts devraient encore s'étendre.

L'analyse des changements d'occupation des terres sur les 40 dernières années permet donc d'avoir des éléments quantitatifs et localisés sur les évolutions passées et en cours de l'occupation des terres, et d'identifier certains des facteurs qui sous-tendent ces processus. Elle fournit dans tous les cas des éléments objectifs de débat pour l'élaboration des politiques publiques d'utilisation des terres en El Salvador par les institutions nationales et les collectivités locales (« municipios » et « mancomunidades »).

### 2.5 L'impact environnemental des populations réfugiées en Guinée forestière

Dans cette étude que j'ai menée pour le compte du Haut Commissariat des Nations-Unies pour les Réfugiés (HCR), il s'agit d'analyser l'impact environnemental de populations réfugiées et de proposer des méthodes.

De manière générale, les conflits et la violence sont les principales causes des déplacements des populations réfugiées. La Convention de 1951<sup>51</sup> définit les réfugiés comme « toute personne craignant avec raison d'être persécutée du fait de sa race, de sa religion, de sa nationalité, de son appartenance à un certain groupe social ou de ses opinions politiques, se trouvant hors du pays dont elle a la nationalité et qui ne peut ou, du fait de cette crainte, ne veut se réclamer de la protection de ce pays [...] ».

En fin 2007, le HCR recensait 31,7 millions de personnes relevant de sa compétence et vivant dans des conditions humanitaires très précaires à l'intérieur ou à l'extérieur de leur pays (Fig. 85). Parmi ces personnes, étaient également comptés les déplacés internes, « personnes ayant été forcées de quitter son foyer — à cause d'un conflit, de persécutions (raisons apparentées à celles des réfugiés) ; ou en raison d'un désastre naturel ou d'autres circonstances similaires ; et restant à l'intérieur des frontières de leur propre pays ».

Globalement sur les dix dernières années, le nombre de réfugiés pris en charge par le HCR est resté relativement stable mais le nombre total de personnes prises en charge n'a pas cessé d'augmenter (Fig. 85).

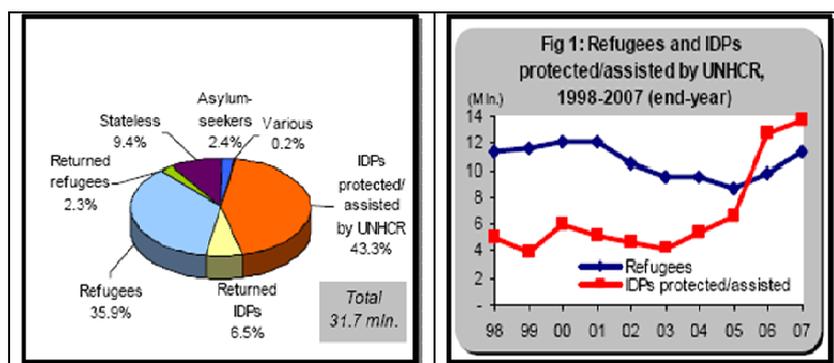


Figure 85. Nombre de personnes relevant du HCR en 2007 et évolution du nombre de réfugiés entre 1998 et 2007 (source: UNHCR).

<sup>51</sup> URL : <http://www2.ohchr.org/french/law/refugies.htm>

Au début des années 2000, un conflit sanglant subsistait encore en Sierra Leone et au Libéria. Ce conflit avait entraîné des afflux massifs de réfugiés en Guinée, pays frontalier. Le HCR nous avait alors demandé de les aider à évaluer l'impact environnemental de ces populations réfugiées et je coordonnais ce projet.

La question environnementale, dans ce contexte, était dès le début du projet relativement biaisée, car elle était perçue le pays d'accueil, la Guinée, mais aussi par le HCR, en termes de dégradation : les réfugiés étaient « bien sûr » responsables de la déforestation, de l'appauvrissement des sols, de la contamination des eaux, de la pression foncière, de l'augmentation des prix des denrées alimentaires... La dimension politique de ces positions « à priori » ne pouvait être évitée puisque la dégradation des ressources naturelles était l'argument majeur avancé par le pays d'accueil pour négocier avec les organisations humanitaires le « prix » de l'accueil.

Il fallait de ce fait éviter dans le projet l'a priori qui consistait à raisonner en termes de « réfugiés = dégradations ». En réalité, les réfugiés sierra léonais et libériens, souvent d'origine rurale, avaient une connaissance aussi grande du milieu naturel que les populations guinéennes et leur rapport à l'environnement était en réalité beaucoup plus complexe qu'on ne le disait.

Pour mieux comprendre cette complexité du rapport à l'environnement, l'analyse diachronique qui fait un bilan de l'« avant » et de l'« après » l'accueil des réfugiés devait donc être complétée par une analyse des processus et des facteurs qui sous-tendaient les éventuels impacts environnementaux, ainsi que par la prise en compte des éventuels impacts économiques et sociaux dans la région d'accueil.

## **La question des réfugiés en Guinée forestière**

### *Une situation délicate due en partie au statut*

La définition de « réfugié » donnée par la convention de 1951, interprétée dans son sens le plus strict, ne prend en compte que les personnes qui fuient individuellement une situation soutenue par leur gouvernement. Les personnes qui fuient en masse ou qui fuient devant une menace d'attaque de groupes rebelles ne peuvent pas obtenir le statut de réfugié. Pour pallier les carences de cette définition internationale et régir les aspects propres aux problèmes des réfugiés en Afrique, l'OUA a élargi le cadre d'application en 1969. « *Toute personne qui du fait d'une agression, d'une occupation extérieure, d'une occupation étrangère ou d'événements troublant l'ordre public dans une partie ou dans la totalité de son pays d'origine ou du pays dont elle a la nationalité, est obligée de quitter sa résidence habituelle pour chercher refuge dans un autre endroit à l'extérieur de son pays d'origine ou du pays dont elle a la nationalité peut alors obtenir le statut de réfugié* » (convention de l'OUA, article 1.2).

Mais ces conventions sont restrictives et la grande majorité des personnes fuyant le Libéria et la Sierra Leone ne pouvait pas obtenir le statut de réfugié de la convention de Genève et de la convention de l'OUA. Ces populations ont donc été placées « sous mandat » du HCR de manière à les considérer comme des réfugiées (Tableau 12).

Statut convention de Genève de 1951	Statut convention de l'OUA de 1969	Sous mandat du HCR	Autres
946	347	176 214	37

Tableau 12. Nombre de « réfugiés » en Guinée en fin 2001 en fonction du statut (source: UNHCR).

### Des droits généralement limités

Le statut de réfugié offre des droits à la personne qui en bénéficie : droits de propriété, d'association, de recours à la justice et d'accès aux services publics. Dans les faits, les droits du réfugié se rapprochent de ceux des ressortissants du pays d'accueil. Mais le statut de réfugié est accordé par le pays d'accueil et il peut arriver que celui-ci ne le donne pas. Dans ce cas, le HCR a fixé des droits minimaux que les pays doivent appliquer pour les populations « non-réfugiées ». Parmi les non-réfugiés se trouvent les personnes en quête d'asile, les personnes n'ayant pas encore déposé de demande de statut de réfugié, les demandeurs d'asile, les personnes en attente de la réponse à la demande et les réfugiés de fait qui ont fui en masse. Jusqu'à leur départ de la zone d'accueil, qui est volontaire, les réfugiés conservent leur statut et leurs droits. Dans le cas de la Guinée, certains réfugiés rencontrés en 2001 étaient présents sur le territoire guinéen depuis plus de dix ans.

Enfin, les déplacés internes, personnes ayant migré à l'intérieur de leur pays, n'ont eue aucun droit. Pour les aider, le HCR a depuis peu un mandat élargi qui peut être appliqué. Heureusement, car au Liberia ces déplacés étaient estimés à 700 000 en 2000, soit le quart de la population du pays.

### Un conflit régional

Plusieurs populations coexistent au Libéria, mais elles se différencient plus par leur histoire que par leur culture. On distingue généralement les « natives », originaires du pays, se répartissant en plusieurs ethnies : les Krahn, les Gio, les Mano... ; les « congoes » capturés pour alimenter le commerce triangulaire, mais jamais esclaves car libérés lors du trajet ; et les Américano-Libériens, anciens esclaves réintégrés en Afrique sous la tutelle de la Société américaine de colonisation.

Jusqu'en 1980 le Libéria a été gouverné par les Américano-Libériens. En avril 1980, Samuel Kanyon Doe de l'ethnie « natives » Krahn provoque un coup d'Etat. Puis en 1989, une nouvelle tentative de coup d'Etat est menée par Charles Taylor, diplômé d'économie aux Etats-Unis et formé à l'organisation de mouvements rebelles en Libye. Les troupes du NPFL qu'il dirige pénètrent sur le territoire libérien à partir de la Côte d'Ivoire et, dès lors, les différents groupes rebelles vont se combattre pour accéder au pouvoir. Le NPFL utilise les méthodes de la guérilla et enrôle dans ses rangs des enfants soldats. De nombreuses violations des droits de l'homme sont commises. Le NPFL soutient la guérilla (RUF) en Sierra Leone. Le conflit s'étend. Pour éviter que la guerre ne se propage à la sous-région, les Etats membres de la Communauté économique des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CDEAO) envoient en 1990 une force d'interposition, l'ECOMOG. De nombreux accords tentent alors en vain de réinstaller le calme dans le pays et jusqu'en 2000 la situation est tendue. Durant toute cette période, les groupes armés commettent des exactions et les Libériens et Sierra Léonais fuient en masse pour se réfugier en Guinée toute proche.

### Le nombre de réfugiés en Guinée forestière

En 2001, au moment des études sur le terrain, la Guinée accueillait encore 178 000 réfugiés recensés par le HCR (Tableau 13), dont 95 527 de la Sierra Leone et 82 792 du Libéria. Cette année-là correspondait à une accalmie sur le front des combats, et beaucoup de réfugiés venaient d'être rapatriés (en 2000, le nombre de réfugiés en Guinée s'élevait à environ 410 000).

	Guinée	Côte d'Ivoire	Libéria	Sierra Leone
Population totale	7 000 000	16 000 000	3 100 000	4 500 000
Capitale	Conakry	Abidjan	Monrovia	Freetown
Nb. de déplacés internes	250 000		700 000	300 000
Nb. de réfugiés dans le pays	178 444	126 239	54 760	10 501
Nb. de réfugiés issus du pays	2 023	858	244 574	179 032

Tableau 13. Données démographiques de la région en 2001 (Source : site internet du HCR).

Ces réfugiés étaient des mêmes ethnies que les autochtones guinéens : Kissi (Guinée et Sierra Leone), Toma, Guerzé et Manon (Guinée et Libéria)<sup>52</sup>. Ils se répartissaient pour la plupart le long de la frontière entre la Guinée et les deux pays en guerre, à moins de 15 km de celle-ci (Fig. 86). Cet « effet frontière » est caractéristique du déplacement de populations réfugiées : ces populations s'installent dès la frontière passée dans l'espoir de retourner rapidement.

Toutefois, en 2001, certains réfugiés avaient trouvé refuge beaucoup plus à l'intérieur du pays où certains se déplaçaient d'un camp à l'autre. C'est là une autre caractéristique de ces populations : elles peuvent être très mobiles et se déplacer fréquemment à l'intérieur d'un espace régional. La carte de l'évolution des sites de réfugiés entre 1997 et 2000 (Fig. 86) illustre cette mobilité, avec des sites d'accueil qui disparaissent, d'autres qui apparaissent entre 1997 et 2000, sur l'ensemble de la Guinée forestière.

En nombre, ces populations étaient mal réparties dans l'espace longeant les frontières : la seule préfecture de Guéckédou par exemple a concentré en 1999 et 2000 68 % de la population totale de réfugiés (Fig. 87).

<sup>52</sup> Suret-Canale J., 1970. *La République de Guinée*. Éditions sociales, Paris . p. 431.

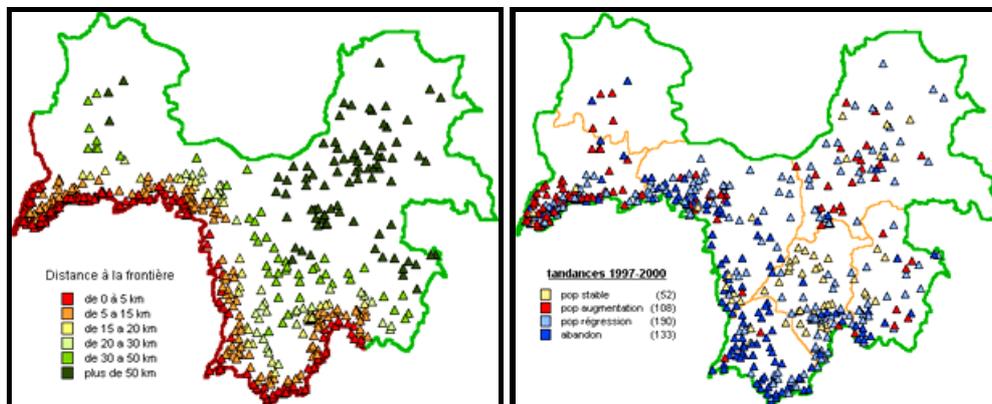


Figure 86. Répartition des populations réfugiées en 1997 et évolution entre 1997 et 1999 en Guinée Forestière (source : Imbernon, Cirad).

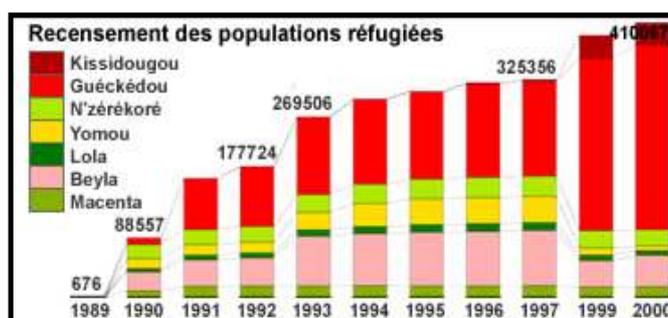


Figure 87. Recensement des populations réfugiées par préfecture (source : UNHCR).

### L'environnement en Guinée forestière

La Guinée forestière est une région administrative, mais aussi naturelle. La région est surmontée par un ensemble de massifs qui forment la dorsale guinéenne (Fig. 88). C'est là que se situent les plus hauts sommets du pays avec le mont Nimba (1 754 m), la chaîne de Ton (1 656 m) et le Konossou (1 345 m). Ces monts sont les derniers refuges où subsistent encore les vestiges de l'ancienne forêt tropicale du golfe de Guinée qui a pratiquement disparu de la région (Fig. 89).

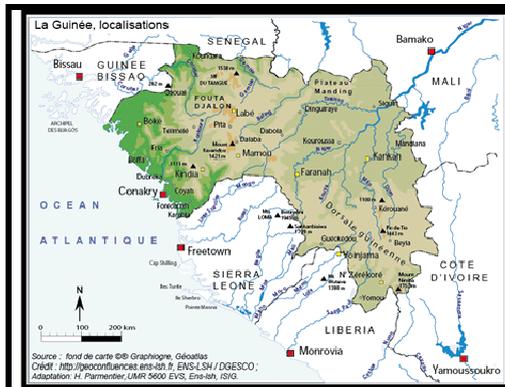


Figure 88. Reliefs et principales localités de Guinée (source : Geoconfluences/ENS).

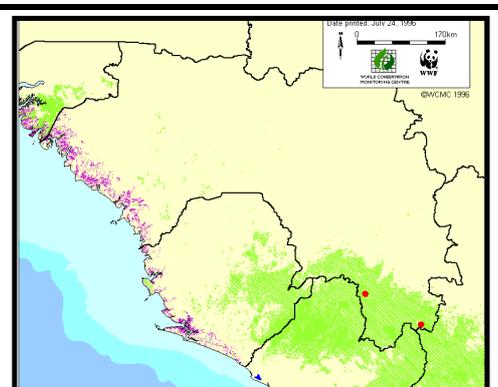


Figure 89. La forêt (vert) en Guinée et dans les pays voisins (source : WCMC).

Généralement, les sols ferrallitiques présents sont favorables à la mise en culture. La présence de roches cristallines fait aussi de la Guinée forestière une région riche en diamant, or, graphite, manganèse, et surtout en minerais de fer (en particulier sur le Mont Nimba). De nombreuses explorations sont en cours (en particulier par des sociétés canadiennes) et les exploitations minières vont probablement se développer dans les années qui viennent.

Le climat de Guinée forestière est de type équatorial, avec une pluviométrie importante et répartie sur toute l'année, même pendant la saison sèche (décembre et janvier). Ce climat humide sur un territoire plutôt accidenté explique la présence d'un réseau hydrographique dense. Une ligne de partage des eaux sépare nettement ce réseau en deux bassins principaux. Toutes les rivières au nord de la ligne de partage alimentent le fleuve Niger et en régularisent le cours. Le réseau hydrographique du bassin océanique, situé au sud de la ligne de partage, est divisé en plusieurs bassins secondaires dont les fleuves côtiers changent de nom au long de leur cours.

Enfin si l'appellation de Guinée forestière vient du paysage forestier de la région, aujourd'hui l'ensemble des surfaces forestières représente moins du tiers de la région (Fig. 89) et la couverture forestière est constituée pour moitié de formations arborées claires résultant du défrichement, riches en parasoliers (*Musanga cecropioides*) et en palmiers à huile (*Elaeis guineensis* jacq.). Seules quelques forêts denses sont préservées grâce au classement en aires nationales protégées pour les forêts de Ziama et Diéké, ou au patrimoine mondial de l'UNESCO pour le massif du mont Nimba.

### Quelle méthode pour évaluer l'impact des populations réfugiées

La question de la mesure de l'impact pose celle de sa représentativité : un problème environnemental peut s'avérer grave en un point et d'importance faible en un autre. Inversement, un problème peut sembler sans conséquences au niveau local et être d'une extrême importance au niveau plus global. Mais ces problèmes environnementaux évoluent aussi en fonction du temps et la dimension temporelle est une composante de cette évaluation.

### La dimension spatiale comme composante intrinsèque de l'environnement

Une analyse géographique multi-échelle a permis à la fois de fournir un diagnostic de la situation environnementale à l'échelle régionale et de faire émerger les principales dynamiques physiques ou sociales au niveau local. Toutes les études locales ont été précédées par une étude à l'échelle régionale pour mettre en évidence la diversité biogéographique des différents sites d'accueil de réfugiés, identifier les diverses formes d'utilisation des terres, et les relier aux effectifs des populations réfugiées et locales.

L'espace est analysé dans cette étude à la fois comme un support des relations complexes entre les composantes du milieu biophysique et les populations autochtones et réfugiées qui en exploitent les ressources et comme un enjeu territorial pour les communautés, par exemple pour l'accès à la terre. Les interactions dans l'espace entre les dynamiques du milieu (par exemple la dégradation du couvert forestier) et les dynamiques sociales sont recherchées et analysées (Fig. 90).

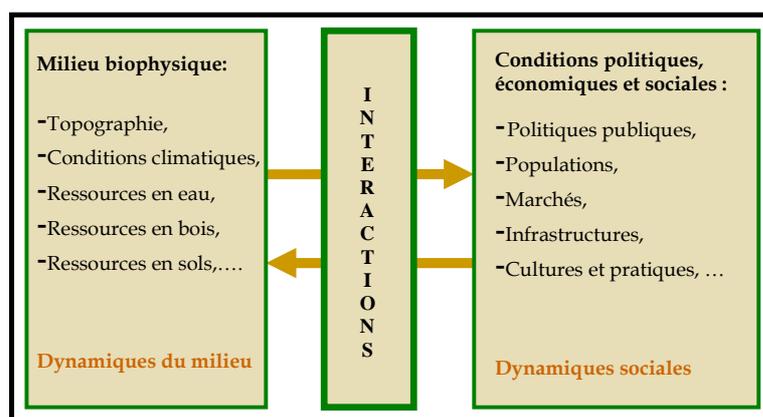


Figure 90. Les cadres d'analyse des interactions dans l'espace (source : Imbernon, Cirad).

### La dimension temporelle de l'impact des réfugiés et la relation espace-temps

La situation environnementale et les facteurs de risques évoluent en fonction du contexte (localisation, type d'asile, accès au territoire, acteurs) mais également en fonction du temps. Par exemple, les dangers de déforestation massive sont a priori plus importants en phase d'urgence que dans les phases suivantes et les ressources en bois mort utilisables par les réfugiés sont d'autant plus rares à proximité d'un camp que son installation est ancienne. Aucune des phases d'intervention du HCR ne peut être envisagée comme un moment figé avec un début et une fin : le temps est non seulement une composante importante de la dynamique environnementale, mais il est étroitement lié à l'espace (aussi bien sur un plan théorique que dans la réalité du terrain et des pratiques).

### L'évolution du couvert forestier dans les régions d'accueil de réfugiés

Cette étude, menée avec des images satellitales à très haute résolution, a pu mettre en évidence une dégradation du couvert forestier à la périphérie immédiate des camps de réfugiés, de 1 à 5 kilomètres (Fig. 91). Cette dégradation est donc limitée spatialement et peu significative à l'échelle régionale, pour l'ensemble de la Guinée forestière.

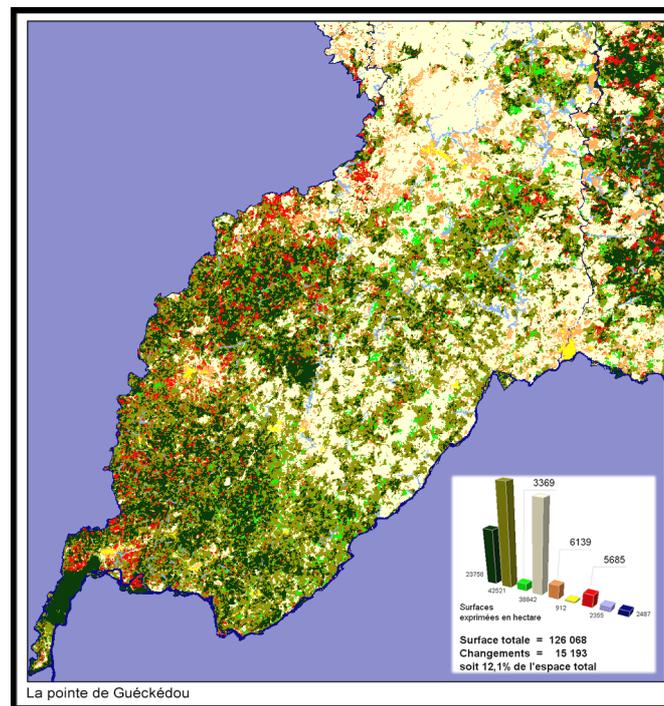


Figure 91. Carte des changements d'occupation des sols entre 1998 et 2001 sur la pointe de Gueckédou – Guinée (source : Bort, Cirad).

Mais la vision de l'évolution du couvert forestier est apparue tout autre dès lors que l'observation est régionale, et en particulier dès lors qu'elle s'intéresse à ce qui se passe aussi de l'autre côté de la frontière entre la Guinée et la Sierra Leone. Sur les photographies aériennes de 1979, donc avant le déclenchement des conflits, le paysage des deux côtés de la frontière ne présente pas de différence perceptible (Fig. 92) : la forêt (en gris sombre) apparaît fragmentée et l'occupation agricole (en gris clair) est relativement importante. Mais sur les images satellitales de 2001, c'est-à-dire après environ dix ans de conflits en Sierra Leone, les paysages apparaissent fortement différenciés entre les deux pays. En Sierra Leone, dans les zones de départ des populations réfugiées, la forêt s'est refermée sur les zones de culture abandonnées : le recru forestier sur les terres anciennement cultivées est estimé à 22,9 % de la surface de cette zone. En Guinée, durant la même

période, l'espace a été soumis à la fois à un processus de déforestation (8,4 % de la surface de la zone) en partie lié à l'accueil de réfugiés (Photo 12), mais aussi de régénération forestière (6,6 %) lié à la pratique traditionnelle de l'agriculture itinérante sur brûlis (Photo 13). Le couvert forestier dans cette région de Guinée n'a diminué que de 1,8 %. Les observations réalisées par télédétection spatiale montrent que cette déforestation est concentrée à la périphérie immédiate des camps de réfugiés (Fig. 91).

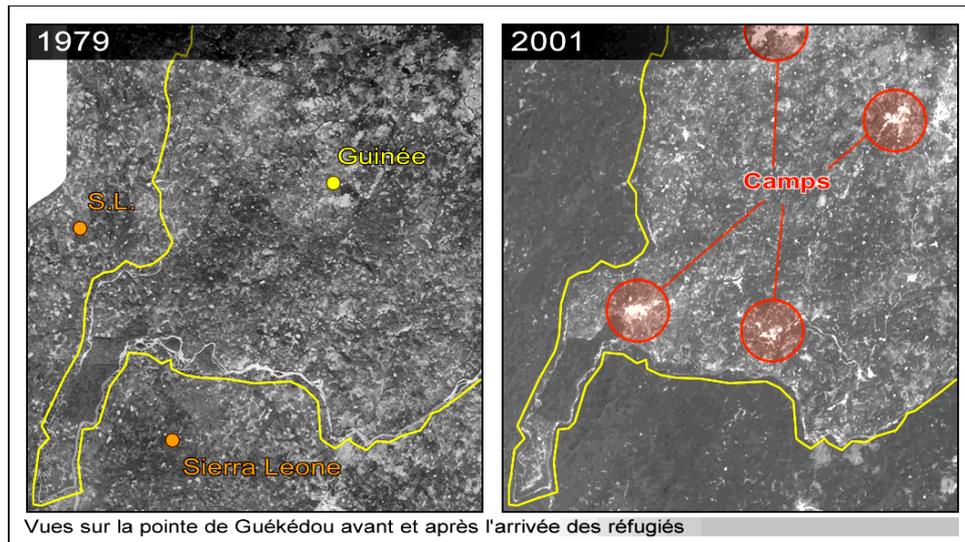
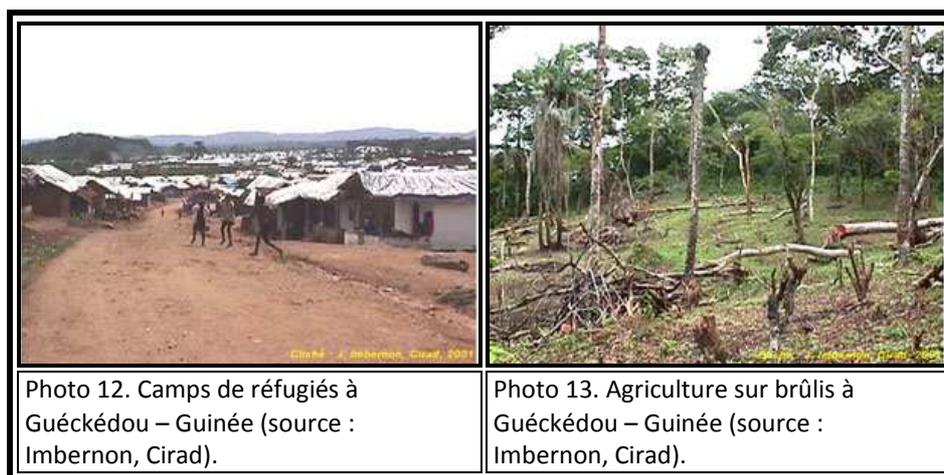


Figure 92. Comparaison entre des photographies aériennes IGN de 1979 et une image Spot de 2001 à la frontière entre Guinée et Sierra Leone (source : Imbernon, Cirad).



Cet effet frontière sur le couvert forestier entre la Sierra Leone et la Guinée est lié sans doute au départ des populations du territoire sierra leonais vers les zones d'accueil de Guinée forestière et à l'abandon de leur terre de culture. Il met en évidence la grande capacité de régénération du couvert forestier dans cette région, qui a permis en 22 ans de passer d'un paysage agricole à un paysage forestier. A l'échelle régionale, et sur cette période de temps relativement longue, l'extension du couvert forestier dans les zones de départ des réfugiés (Sierra Leone) serait de fait largement supérieure à la déforestation provoquée par ces mêmes réfugiés dans les zones d'accueil (Guinée).

### **L'insertion des réfugiés dans l'économie régionale**

Au-delà des questions environnementales, la question des pressions exercées par les réfugiés sur les ressources naturelles ne peut être déconnectée de leur insertion dans l'économie régionale. Les échanges commerciaux sont un moteur et un révélateur des sollicitations exercées sur les structures productives et les ressources naturelles. Aussi, afin de confronter ces sollicitations aux enjeux de l'économie, les circuits et les pôles de redistribution des marchandises à l'échelle régionale ont été enquêtés. Ces enquêtes ont révélé un réseau complexe d'acteurs, avec des acteurs collectant les produits eux-mêmes, relayant les productions réalisées par les agriculteurs ou approvisionnant les marchés. Ces études ont mis en évidence l'interdépendance des différents acteurs et la complémentarité des fonctions de collecte, de transport, de stockage et de redistribution.

Dans cette étude, les réfugiés n'ont pas été considérés isolément, mais aux côtés des locaux, agissant en même temps que ces derniers dans un espace partagé entre ces deux populations, même provisoirement. Cela a permis de considérer la dégradation des ressources naturelles comme le produit d'une série d'interactions et d'éviter le risque de l'explication monocausale de la dégradation, si souvent avancée par les autorités locales.

#### Les réseaux d'échange et de distribution liés aux réfugiés

L'installation des réfugiés a donné lieu à des camps, mis en place par le HCR. Certains de ces camps équivalent par leurs effectifs à des concentrations urbaines de la région. Ainsi les camps de Kouankan (au nord de Sérédou) et de Boréah (au nord de Kissidougou) accueillait en 2001 plus de 13 000 réfugiés à eux deux. Mais quel que soit le type d'installation, rural ou urbain, en camp isolé ou non, la population réfugiée s'est installée auprès de populations autochtones répondant aux sollicitations du marché.

Pour alimenter ces marchés, des filières spécialisées de café, de cacao et d'huile de palme existaient, reliées aux centres du commerce régional par des négociants et des collecteurs. Les réfugiés se sont insérés dans ces réseaux marchands et dans les centres d'activités que constituent les marchés de la région. Cette intégration au commerce régional a conforté le besoin de s'interroger sur l'implication des réfugiés dans l'activité économique de la région.

Le plus souvent, le surplus démographique lors des situations de crise amène à raisonner la question de l'impact des réfugiés sur le commerce régional en termes :

- d'augmentation de la demande en produits de consommation de base ;
- et de développement de filières de redistribution à partir des villes vers les zones d'accueil de réfugiés.

Or cette étude a montré que les flux commerciaux qui traversent la Guinée forestière suivent le sens exactement inverse : des villages vers les villes, via des marchés intermédiaires de collecte. L'insolvabilité de la plupart des

réfugiés, de fait approvisionnés par l'aide humanitaire internationale, explique sans doute qu'ils ne constituent pas un débouché nouveau pour les productions régionales. Les espaces où évoluent les réfugiés continuent à fournir des produits agricoles, et non à absorber une offre émanant d'autres zones de production.

*Au lieu de raisonner en termes de demande, il faut donc raisonner en termes d'offre, en incluant la participation des réfugiés à l'offre de produits pour les marchés régionaux.*

#### La contribution des réfugiés aux circuits d'échange

Les réfugiés interviennent dans les filières de café, de cacao et de cola (en particulier dans la zone de Katkama, au sud-ouest de Guéckédou). Ils interviennent également dans la filière du bois et dans celle du riz. Ils ont une grande expérience dans ces activités commerciales, et interviennent dans la collecte et le transport à partir des zones de production de cola, de café et de cacao. Ils interviennent également dans la transformation du riz par étuvage et décorticage.

D'une manière générale, les différentes enquêtes réalisées ont montré que :

- les réfugiés interviennent à tous les niveaux de ces filières commerciales ;
- leur contribution aux circuits d'échange freine les pratiques de pénuries qu'organisaient les commerçants ;
- leur capacité de négociation des prix avec les paysans, mais aussi leur capacité à être mobiles, a largement contribué à les insérer dans des filières pourtant étroitement contrôlées par les Guinéens ;
- les réfugiés ont réalisé un véritable transfert de compétences dans des métiers d'artisanat comme la menuiserie ou la mécanique ;
- le transport a connu un essor important grâce aux réfugiés, car certains étaient venus avec leurs propres véhicules. La desserte sur l'ensemble du réseau régional de transport, et en particulier la desserte des marchés ruraux, a été fortement améliorée.

#### **L'insertion des réfugiés dans les structures productives en milieu rural.**

Les enquêtes menées dans les villages ont montré que les populations réfugiées et autochtones n'ont pas accès aux mêmes moyens de production agricole.

#### L'accès à la terre

Les modalités d'accès à la terre ont été caractérisées dans cette étude avant et après l'arrivée des réfugiés pour mieux cerner leur impact.

##### *Situation antérieure : un système traditionnel*

Les modalités d'accès au foncier varient selon les ethnies, mais on retrouve toujours au centre du système un chef de terre, descendant de la famille fondatrice du village. C'est à cette famille qu'appartient traditionnellement tout le territoire. La terre est transmise par héritage aux descendants ou donnée à ceux qui viennent s'installer (souvent les neveux ou des beaux frères). Ces derniers deviennent propriétaires par droit de hache (le premier défrichement) et peuvent à leur tour transmettre leur terre par héritage. Cependant la terre ne leur appartient pas vraiment en propre, elle reste propriété de la famille fondatrice. Les terres peuvent être prêtées pour une durée déterminée, gratuitement même si le bénéficiaire donne souvent des cadeaux au prêteur. En pratique, lorsqu'un étranger cherche à s'installer, il doit trouver un tuteur, c'est-à-dire une personne intermédiaire entre lui et le chef de terre. C'est le tuteur qui lui prête la terre à cultiver.

D'autre part, tout étranger qui veut cultiver dans le territoire villageois doit construire une maison dans le village : c'est signe qu'il en fait vraiment partie et qu'il va partager la vie de la communauté.

*Insertion des réfugiés : un système de prêts*

L'accès des réfugiés à la terre et aux ressources naturelles s'est fait selon des modalités différentes selon la qualité des réfugiés : directement insérés dans un village ou vivant dans un camp (cf. tableau 14). En règle générale les réfugiés ont eu accès à la terre par des prêts de courte durée auprès des autochtones.

	<b>Coutume (héritage, don)</b>	<b>Prêt (avec ou sans condition)</b>	<b>Vente et combinaisons(*)</b>	<b>Effectif enquêté</b>
Non-réfugiés (%)	75	5	20	321
Réfugiés intégrés dans les villages (%)	24	71	5	66
Réfugiés dans les camps (%)	0	100	0	55

\* coutume, prêt, vente

Tableau 14. Mode d'accès à la terre en Guinée forestière (Source : AP/IRAG/VD-PGC).

La majorité des terres prêtées sont des terres de coteau, le plus souvent occupées par des savanes. Les prêts sont généralement d'un an, avec ou sans condition (attente d'un cadeau à la récolte ou loyer) (cf. tableau 15).

	<b>Prêt gratuit (cadeau attendu)</b>	<b>Fermage</b>	<b>Effectif enquêté</b>
Non-réfugiés (%)	85	15	309
Réfugiés intégrés dans les villages (%)	92	8	63
Réfugiés dans les camps (%)	69	31	42

Tableau 15. Mode de prêt de la terre (source : AP/IRAG/VD-PGC).

Le travail

*Situation antérieure : des organisations multiples*

Le travail est familial. La taille de la famille a donc une grande importance et la polygamie est fréquente. Les femmes et les enfants sont autant de force de travail. Lorsque des pics de travaux se présentent, des groupes d'entraide peuvent se former spontanément. Tous les villages étudiés en Guinée forestière ont des groupements organisés, souvent par catégories de population : les femmes, les jeunes, les hommes, etc. Le groupement va aider la personne qui le lui demande et en échange celle-ci nourrit les travailleurs du groupement et cotise à une caisse commune pour les dépenses du village, les fêtes, les décès, etc. Mais le recours à la main-d'œuvre

contractuelle (du village ou d'ailleurs) est fréquent. C'est aussi l'occasion de nouvelles installations dans les villages (comme les Malinkés et les Peuhls dans le village de Dandano).

*Situation avec les réfugiés : une importante offre de travail salarié*

L'arrivée des populations réfugiées a augmenté la disponibilité en main-d'œuvre. A proximité des camps comme celui de Kouankan, les prix de la main-d'œuvre ont diminué. Les populations guinéennes utilisent cette main-d'œuvre réfugiée, mais les réfugiés eux-mêmes peuvent en employer : c'est alors une manière de faire travailler ses relations et ses amis (Tableau 16). Dans l'ensemble de la région, l'augmentation de la disponibilité et du recours à la main-d'œuvre a augmenté la monétarisation du travail par rapport à la situation antérieure au conflit.

	Emploi de main-d'œuvre	Pas de main-d'œuvre	Effectif enquêté
Non-réfugiés (%)	51	49	322
Réfugiés intégrés dans les villages (%)	44	56	68
Réfugiés dans les camps (%)	0	100	67

Tableau 16. Recours à de la main-d'œuvre (source : AP/IRAG/VD-PGC).

*Le capital : l'importance des plantations*

Le niveau de capitalisation des exploitations dans villages étudiés reste faible : les exploitations n'ont généralement pas d'équipement, seulement une petite houe traditionnelle (« daba »). Leur véritable capital est constitué par les plantations pérennes de café, cacao et cola. Même si elles sont parfois exploitées à perte, ces plantations constituent pour les paysans une garantie pour l'avenir et le moyen d'assurer un patrimoine pour leurs enfants. Plus récemment, l'aménagement des bas-fonds est devenu une nouvelle forme de capitalisation. Quand un paysan décide d'aménager un bas-fond, il signe un contrat avec la structure qui s'occupe de l'aménagement et il en devient propriétaire devant la loi. Enfin, les animaux constituent un capital, même si l'élevage dans cette région forestière est une activité marginale et se limite à quelques poules et moutons.

*Les conséquences sur les structures productives*

L'accueil des réfugiés dans la région a créé des pressions sur les structures productives agricoles, et en particulier sur le foncier, les ressources naturelles et les systèmes de production.

*Extension du domaine cultivé: augmentation de la pression foncière*

La présence des réfugiés et les facteurs de production auxquels ils ont accès, notamment la terre, ont entraîné des changements dans l'utilisation de la terre. Des espaces non cultivés sont mis en valeur. Les champs vivriers de coteau sont de plus en plus éloignés du village. Les systèmes de culture traditionnels, extensifs,

basés sur la jachère, sont soumis à la pression foncière. Et des bas-fonds sont aménagés, là où c'est possible, pour la culture du riz inondé.

*Activités d'extraction : une pression sur les ressources naturelles*

La pression sur les palmiers à huile ou les autres produits de la forêt a augmenté. L'huile de palmiste est passée, avec l'arrivée des réfugiés, du statut de production destinée à la consommation familiale à celui de production destinée à la vente. Le prélèvement de bois pour la cuisson s'est développé mais sans avoir les conséquences catastrophiques redoutées, car les réfugiés préfèrent prélever du bois mort qui n'a pas besoin de sécher et qu'ils peuvent utiliser directement. De ce fait, de nouvelles règles ont été introduites pour limiter l'accès de ces ressources aux populations réfugiées.

*Productions agricoles : une diversification des systèmes de production*

La diversité des systèmes de production agricoles est liée aux différences d'accès aux facteurs de production. Du fait de l'absence de sécurisation foncière et de capital, les réfugiés ne pratiquent que des cultures vivrières (de coteau ou de bas-fond) alors que la majorité des autochtones possède des plantations (palmier à huile, café, cacao...) en plus des parcelles de coteau (Tableau 17).

	Non-réfués	Réfués dans les villages	Réfués dans les camps
<b>Effectif</b>	<b>202</b>	<b>50</b>	<b>65</b>
Riz de bas-fond non aménagé (%)	6	44	6
Riz de bas-fond aménagé (%)	0	0	57
Riz de coteau (%)	9	16	25
Riz de bas-fond non aménagé et riz de coteau	5	12	2
Riz de bas-fond aménagé et riz de coteau	0	0	11
Riz de bas-fond non aménagé et plantations (%)	12	4	0
Riz de coteau et plantations (%)	50	18	0
Riz de bas-fond non aménagé et riz de coteau et plantations (%)	18	6	0

Tableau 17: Les différents systèmes de production (source : AP/IRAG/VD-PGC).

La part relative des différents systèmes de riz de coteau, de bas-fond non aménagé et aménagé, et de plantations est un signe de reconnaissance sociale : ceux qui possèdent des plantations ont une position sociale plus élevée que ceux qui n'en ont pas ; ceux qui n'ont que des bas-fonds non aménagés sont moins reconnus que ceux qui ont des champs de coteau, etc. Mais de manière générale les réfugiés ont insufflé une

dynamique nouvelle aux systèmes de production autochtones en introduisant de nouveaux modes de production.

*Au travers des ces travaux de recherche :*

- *déforestation dans les grands bassins forestiers tropicaux par les agricultures sur brûlis,*
- *saturation des espaces dans les hautes terres d'Afrique centrale et interactions l'évolution des basses terre,*
- *évolution de l'occupation des terres en Amérique centrale sur les 60 dernières années en lien avec les politiques publiques et les marchés,*
- *et impact de populations réfugiées en Guinée forestière,*

*l'intérêt d'étudier l'occupation des terres apparait comme un enjeu pour comprendre les dynamiques environnementales et sociales. Dans ces recherches, les données satellitales ont été largement utilisées. Mais le traitement de ces données n'a pas été une fin en-soi, mais un moyen d'accéder à une information spatiale à jour qui m'a permis de caractériser des états et des changements, et, dans l'analyse des causalités, de les mettre en relation avec des observations de terrain, des enquêtes et des données statistiques. Nos connaissances sont encore très limitées dans ce domaine et la rencontre entre les sciences spatiales et les sciences sociales et politiques restent une absolue nécessité si nous voulons avancer dans la compréhension des processus en cours aux différentes échelles, à la surface de la terre. Il est au moins un domaine pour lequel se sont retrouvées différentes compétences, c'est celui de l'analyse des paysages. Ce domaine théorique et d'application m'a intéressé et a guidé certains de mes travaux.*

### **3 Un niveau d'intégration pertinent : la fragmentation et la connectivité des paysages**

Que ce soit pour le géographe, l'historien ou l'écologue, le paysage constitue un objet de recherche. Le géographe cherche à décrire les activités humaines et le milieu physique; l'historien recherche les traces anciennes de la civilisation ; l'écologue s'intéresse aux interactions entre écosystèmes. Cela vient du fait que le paysage est « synthétique » : il est formé de composantes abiotiques et biotiques (espèces, écosystèmes, agrosystèmes...), culturelles (historique, d'ordre esthétique...) et socio-économiques (lieu d'habitat, de travail, de loisir, d'aménagements divers).

Parmi ces diverses façons d'aborder le paysage, invariablement le paysage est considéré comme « une surface comprenant une mosaïque d'éléments ». Mais là s'arrête la convergence des approches et de nombreuses distinctions apparaissent ensuite selon la nature des éléments du paysage à considérer ou selon la position de l'observateur. L'une des approches les plus intéressantes a été développée par les écologues dans les années 1980 : « l'écologie du paysage » (« Landscape Ecology »<sup>53</sup>).

L'écologie du paysage prend en compte l'hétérogénéité spatiale dans le fonctionnement des systèmes écologiques. Le paysage est considéré en tant que « système écologique, c'est-à-dire un ensemble d'éléments chimiques, biologiques et socio-économiques dont les interactions déterminent les possibilités de vie »<sup>54</sup>. Selon de point de vue, l'analyse du paysage devient « l'étude des facteurs écologiques intervenant dans la formation du paysage ainsi que l'étude du rôle de la structure du paysage dans le fonctionnement des systèmes écologiques que l'on y rencontre ». Avec l'écologie du paysage, il s'agit alors d'analyser les motifs spatiaux du paysage pour les mettre en relation avec le fonctionnement des écosystèmes.

<sup>53</sup> Forman R.T.T., Godron M., 1986. *Landscape ecology*. Ed. John Wiley and Sons, New York. 619 p.

<sup>54</sup> Baudry J., 1986. *Approche écologique du paysage*. INRAP, Foucher. p. 23-32.

Pour analyser les motifs spatiaux, des méthodes quantitatives ont été développées à la fin des années 1980. Ces méthodes permettent de comparer les paysages entre eux et de mettre en évidence les relations entre les processus fonctionnels et les motifs de paysage. Ces méthodes m'ont paru intéressantes et je les ai utilisées dans les années 1990 pour analyser les dynamiques de déforestation dans les grands bassins forestiers tropicaux (projet «Alternatives to Slash-and-Burn») ou la connectivité des forêts dans le corridor biologique méso-américain en Amérique centrale.

### 3.1 Mobilisation de concepts de l'écologie du paysage

#### Structure et fonctionnement du paysage

La théorie de l'écologie du paysage formulée par Forman and Godron (1986) différencie trois caractéristiques du paysage : sa structure, son fonctionnement et son changement. La structure du paysage se réfère aux relations spatiales entre les différents écosystèmes : cela concerne les flux d'énergie, de matériel et d'espèces, en relation avec la taille, la forme, le nombre, la nature et la configuration des éléments qui constituent le paysage, appelés des *patches* (Fig. 93). Ce terme de *patches* peut être traduit par « tâches » ou « polygones ».

Mais le terme anglais, plus utilisé et moins équivoque que les termes français dans le contexte, est conservé. La délimitation entre les différents *patches* du paysage dépend du système de classification utilisé pour décrire ce paysage et de l'échelle spatiale de l'observation. Le type de *patch* le plus étendu et le plus connecté dans le paysage est appelé la « matrice » du paysage. Bien entendu, cette matrice joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement du paysage.

La structure du paysage est caractérisée à la fois par sa composition et sa configuration<sup>55</sup>. La composition du paysage se réfère à la distribution de fréquence des différents types (classes) de *patches*. Elle représente la diversité et l'abondance des types de *patches* dans le paysage, mais sans donner d'indication sur leur emplacement dans la mosaïque paysagère. La configuration du paysage se réfère à la distribution spatiale et aux caractéristiques morphologiques des *patches*, liées à leur emplacement ou à leur forme.

La structure du paysage est fortement dépendante de l'échelle spatiale de l'observation que ce soit l'étendue et la résolution (grain) spatiale de l'observation. Etendue et grain constituent les limites supérieure et inférieure d'observation. De fait, les structures spatiales observables seront différentes à chaque échelle d'observation<sup>56</sup> et l'échelle d'observation doit donc être soigneusement choisie en fonction du processus étudié.

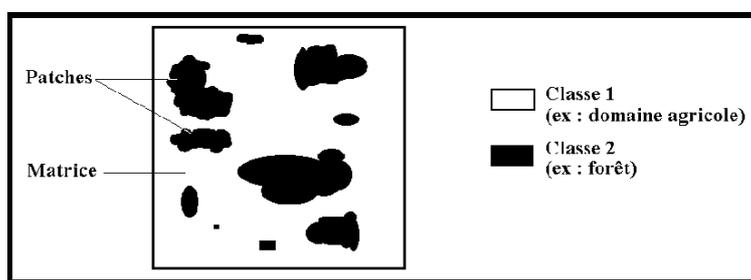


Figure 93. Les éléments constitutifs d'un paysage : la matrice correspond à la classe 1 d'occupation des terres (source : Forman *et al.* 1986).

<sup>55</sup> Dunning, J. B., Danielson, J. B. and Pulliam, H. R. 1992. *Ecological processes that affect populations in complex landscapes*. *Oikos*, vol. 65, n°1, p. 169-175.

<sup>56</sup> Wiens J.A., 1989. *Spatial scaling in ecology*. *Functional Ecology*, n°3, p. 385-397.

## Transformation des paysages et dynamiques spatiales

Le paysage est un objet dynamique qui évolue avec le temps, qui se transforme. Son analyse comprend à la fois une dimension spatiale et une dimension temporelle. Forman (1995)<sup>57</sup> distingue cinq processus spatiaux dans la transformation du paysage (Fig. 94).

- La perforation est un processus qui conduit à la formation de trous dans un couvert. Il intervient surtout au début d'un processus de transformation du paysage, et se rencontre dans les processus de déforestation tropicale.
- La dissection correspond au découpage et à la subdivision d'une surface par une ligne d'épaisseur uniforme, comme une piste d'exploitation forestière pénétrant la forêt tropicale.
- La fragmentation constitue la segmentation d'un type de couvert ou d'un habitat en plus petits patches.
- Le rétrécissement (*shrinkage*) est la diminution de la taille des *patches*.
- La disparition (*attrition*) représente la disparition des *patches* ou des corridors.

Chacun de ces processus a des effets distincts sur le paysage. Le processus de fragmentation par exemple, outre le fait d'augmenter le nombre de *patches* et la longueur des bordures, va diminuer l'habitat intérieur et la connectivité (Figure 94).

Processus spatial	Nombre de patches	Taille moyenne des patches	Habitat intérieur	Connectivité à travers la surface	Longueur totale des bordures	Habitat	
						Perte	Isolem <sup>t</sup>
 Perforation	0	-	-	0	+	+	+
 Dissection	+	-	-	-	+	+	+
 Fragmentation	+	-	-	-	+	+	+
 Rétrécissement	0	-	-	0	-	+	+
 Disparition	-	+	-	0	-	+	+

+ Augmentation    - Diminution, 0 Absence de changement)

Figure 94. Les principaux processus spatiaux de transformation du paysage et leurs effets sur les attributs du paysage (source : Forman, 1995).

### Fragmentation du paysage

Le processus à l'échelle du paysage dans lequel la classe considérée est progressivement subdivisée en fragments de plus en plus petits et isolés est appelé fragmentation. Le processus de fragmentation résulte à la fois de facteurs naturels (topographie, température, précipitation, sols, perturbations naturelles...) et de

<sup>57</sup> Forman R.T.T., 1995. *Land Mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge. 632 p.

facteurs anthropiques (systèmes agraires, pratiques agricoles, migration de population, activités d'exploitation...). Il a des effets directs sur l'écologie, car en augmentant l'isolement des habitats, le nombre d'espèces « généralistes », « multi-habitat », de lisière ou exotiques, a de fait tendance à croître. Par contre, d'autres d'espèces ne peuvent maintenir de populations viables dans les petits *patches* et, dans ce cas, la fragmentation conduit à l'extinction de certaines espèces et à une perte de biodiversité.

### Indicateurs de structure du paysage

Pour quantifier la structure spatiale d'un paysage, des indices de structure ont été développés. Ils sont calculés en prenant en compte le nombre de *patches*, leur périmètre ou leur surface, ou encore la distance les séparant, soit dans une classe soit sur l'ensemble des classes. Des méthodes et des outils de calcul de ces indices sont disponibles depuis de nombreuses années. Le plus connu est le logiciel Fragstats mis au point par Mac Garigal K. et Marks B.J. (Oregon State University). Il permet de calculer des indices à partir de la dimension, de la géométrie et de la distribution spatiale des *patches* qui forment le paysage. Il calcule trois groupes d'indices qui correspondent à trois niveaux de perception différents : pour chaque *patch* du paysage, pour chaque classe de *patch*, et pour l'ensemble du paysage (tous les *patches*).

Deux grands types d'indices sont en général utilisés pour caractériser la structure d'un paysage : les indices de composition et les indices de configuration du paysage. Les indices de composition traduisent la variété et l'abondance des différents types de *patches* dans le paysage. Les indices de configuration du paysage renseignent sur la distribution physique des *patches* dans le paysage et sur leurs caractéristiques de forme. Ces indices sont les indices de densité, de taille et de variabilité de la taille des *patches*, les indices de forme, complexité de forme et les indices fractals, les indices de bord et les indices de plus proche voisin.

Dans l'analyse des processus de déforestation pour le projet «Alternatives to Slash-and-Burn», lors de mon positionnement à l'ICRAF-Nairobi, j'ai cherché à utiliser ces indicateurs quantitatifs pour mieux caractériser les processus en jeux sur les terrains d'étude du projet.

### Connectivité et corridors biologiques

La connectivité du paysage est la capacité à maintenir les connexions entre les différents éléments du paysage. Elle dépend des aspects physiques et structurels du paysage, mais aussi des caractéristiques des flux écologiques qui le traversent<sup>58</sup>. Elle est liée à la perméabilité des différents éléments du paysage - certains éléments du paysage peuvent être des barrières infranchissables. Les noyaux de *patches* forment les sources de dispersion, et selon Bennet (1998)<sup>59</sup> la connectivité entre deux noyaux dépendra principalement de trois propriétés : la perméabilité du paysage, la présence de corridors et la présence de points de passages.

La fonction des corridors biologiques a commencé à être étudiée au début des années 1990<sup>60</sup>, mais avec des perceptions fort différentes : perceptions structurelles, de fonctionnement ou de gestion du paysage, et perceptions spécifiques à chaque espèce... Cette relative confusion a suscité des polémiques<sup>61</sup> sur les fonctions de ces corridors. Malgré cela, de nombreuses initiatives de corridors biologiques ont vu le jour dans les différentes régions du monde. Le Corridor biologique méso-américain (CBM) en Amérique centrale, censé

<sup>58</sup> Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G., 1993. *Connectivity is a vital element of landscape structure*. *Oikos*, n° 68. p. 571-573.

<sup>59</sup> Bennett, A. F., 1998. *Linkages in the landscape: the role of corridors and sensitivity in wildlife conservation*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 254

<sup>60</sup> Saunders D.A. and Hobbs R.J.Editors, 1991. *Nature Conservation 2: The Role of Corridors*. Chipping Norton N.S.W., Australia. 442 p.

<sup>61</sup> Beier P., Noss R., 1998. *Do habitat corridors provide connectivity?* *Conservation Biology*, n°12(6). p. 1241-1252.

relier les deux continents Sud et Nord au travers de l'isthme centraméricain, est l'une de ces initiatives. J'ai pu y contribuer lors de mon positionnement au ministère de l'Environnement (MARN) d'El Salvador. Je vais donc présenter ici deux études que j'ai menées : l'une pour le projet « Alternatives to Slash and Burn » (ASB) sur les frontières agricoles dans les grands bassins forestiers, et l'autre pour le Corridor biologique meso-américain (CBM). Elles permettent d'illustrer l'intérêt des concepts et des outils de l'« écologie du paysage ».

### **3.2 Fragmentation des paysages sur des « frontières agricoles » des grands bassins forestiers tropicaux**

L'objectif de cette étude menée dans le projet ASB était de caractériser, de comparer et de suivre quantitativement les motifs de paysages de déforestation dans les grands bassins forestiers tropicaux, et de mettre en relation des indices de fragmentation et de structure avec des facteurs socio-économiques et biophysiques. Les 7 terrains d'étude du projet ASB ont été analysés de ce point de vue, en mobilisant les données satellitales disponibles.

#### **Les images satellitales**

Sur les sept terrains d'étude du projet, j'ai dans un premier temps classé les images Spot prises en 1995 ou 1996 en 3 thèmes seulement : forêt, domaine agricole et autre. La classe « forêt » représente les forêts primaires et secondaires ; la classe « domaine agricole » comprend les terrains cultivés et les jachères ; et la classe « autre » regroupe les nuages, les ombres des nuages, les villes, les sols nus et les eaux de surface. Dans certains cas, une classe supplémentaire a été rajoutée, comme c'est le cas de la classe « savane » sur le site de M'Balmayo au Cameroun.

Pour disposer d'un jeu de données homogènes et comparer les différents sites, chaque image satellitale a été découpée selon un carré de 48 km de côté, de dimension et de résolution identiques (Fig. 95). C'est sur ces images que les indicateurs spatiaux ont été calculés, analysés et comparés.

Ensuite, pour suivre l'évolution de la déforestation et analyser les processus spatiaux, nous n'avons utilisé que le site de Theobroma au Pérou, où nous disposons d'une séquence de 6 images (Landsat MSS, Landsat TM et Spot) sur une période de 23 ans, de 1973 à 1996. Pour analyser cette série, le *municipio* de Theobroma a été extrait et toutes les images ont été ramenées par re-échantillonnage spatial à une seule et même résolution de 20 m (Fig. 96). Sur ces 6 images, les patches de faible dimension (de taille inférieure ou égale à 5 pixels) ont été supprimés pour limiter l'effet lié aux différentes résolutions spatiales des capteurs utilisés. Enfin, pour s'affranchir des nuages et à ne pas introduire de biais dans l'analyse temporelle, un masque de tous les nuages observables sur la série d'images a été appliqué à chacune des images.

#### **Les indicateurs spatiaux de fragmentation**

L'analyse a porté plus sur la structure spatiale (vision géographique) que sur la fonction du paysage (vis écologique). De fait les indices de bords et les indices de la surface du noyau n'ont pas été calculés. Par contre, l'indice de proximité a été pris en compte, en considérant comme le fait la FAO que les effets de lisières entre forêt et non-forêt agissaient jusqu'à 1 km de la bordure. Mais le choix des indicateurs, parmi les 71 indicateurs calculés par le logiciel Fragstats, a été la première difficulté à surmonter.

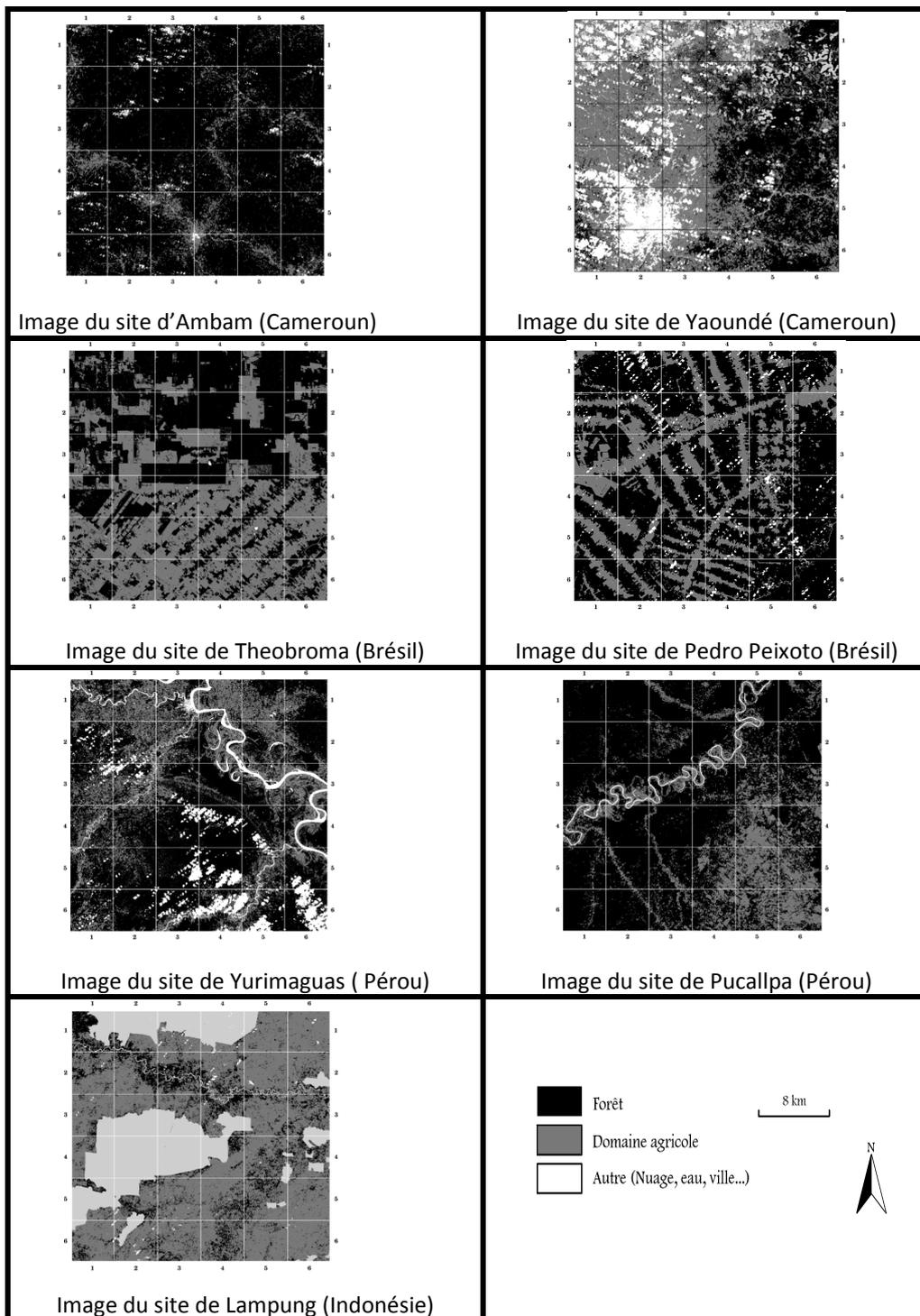


Figure 95. Occupation des terres à partir d'images Spot (source : Imbernon, Cirad).



Figure 96. Occupation des terres en 1996 sur le *municipio* de Theobroma à partir d'une image Spot (source : Imbernon, Cirad).

#### Choix des Indices pour la comparaison intersites

Pour comparer les différents terrains d'étude, les 71 indices ont été calculés automatiquement par le logiciel Fragstats. Mais l'analyse d'un tel nombre d'indices n'est pas réaliste et une sélection des indices les plus pertinents devait être faite.

#### *Elimination des indices fortement autocorrélés*

Une matrice de corrélation sur les indices de tous les sites réunis a été établie de manière à identifier les indices les plus fortement corrélés entre eux ( $r^2$  supérieur à 0,9) et ne conserver qu'un seul indice parmi ceux-ci. Cette première analyse statistique a permis de ne conserver que 35 indices faiblement autocorrélés.

#### *Réalisation d'une analyse de variance à un seul facteur*

Une analyse de variance a permis d'identifier les indices qui différencient le mieux les sites entre eux, c'est-à-dire ceux pour lesquels la variabilité intra-site est minimale et la variabilité inter-site est maximale. A l'issue de cette étape, 7 indices ont été conservés pour caractériser la fragmentation sur les 7 sites d'étude (Tableau 18).

Nombre de patches de domaine agricole	NPC2
Dimension fractale des patches	DLFDp
Pourcentage occupé par la forêt	%LANDc1)
Indice de Matheron	Mlc1
Indice de proximité des patches	MPlc1
Taille moyenne des patches du domaine agricole	MPSc2
Moyenne des distances au plus proche voisin	MNNc1

Tableau 18. Indices spatiaux sélectionnés pour l'analyse de la fragmentation du couvert forestier en zone de déforestation (source : Imbernon, Cirad).

#### Choix d'indices pour l'analyse spatio-temporelle

Pour les six images du site de Théobroma entre 1973 et 1996, les indices spatiaux ont été choisis empiriquement. Pour traduire le processus de déforestation sur ce site, le choix s'est porté sur le pourcentage de forêt, la taille moyenne des patches de forêt, le nombre ou la densité de patches de forêt, le nombre et la taille moyenne des patches du domaine agricole, la forme et complexité de la forme des patches (dimension fractale, indices de Matheron) et la distance au plus proche voisin.

#### **Analyse comparative entre les sites de déforestation**

Les valeurs moyennes des indices pour les 7 sites permettent aisément de les différencier (Tableau 19). Par exemple, le paysage de Yurimaguas (Pérou) est fortement fragmenté et peu forestier, alors que le paysage de Pucallpa (Pérou) est moins fragmenté et plus forestier. Les sites de Lampung (Sumatra) et Ambam (Cameroun) sont très différents l'un de l'autre : Lampung n'a pratiquement plus de forêt et n'est pas du tout fragmenté, alors qu'Ambam est très forestier et relativement fragmenté.

Pour compléter cette analyse comparative, la variabilité interne de chaque site a été analysée en calculant ces indices sur chaque maille d'une grille régulière. Ce calcul permet de quantifier la variabilité interne de chaque indice (écart-type). Je donne ci-dessous deux exemples: le pourcentage de forêt qui est un indice simple de composition du paysage et la dimension fractale qui traduit la complexité du paysage.

Sur le site d'Ambam, la forêt occupe la plus grande partie de l'espace (87 %), et ce de façon relativement uniforme, car le taux de couvert forestier de chacune des cellules n'est jamais inférieur à 66 % (Fig. 97). Le site de Pucallpa est également très forestier : la forêt y occupe 74 % de l'espace. Mais sur le site de Theobroma, la forêt ne couvre que la moitié de l'espace et sur les sites de Yaoundé et de Lampung la forêt n'occupe plus que 31 % et 14 % de l'espace. En observant la répartition des écarts types statistiques, les sites d'Ambam et de Lampung apparaissent relativement homogènes alors que la variabilité interne des sites de Pucallpa et Yaoundé est élevée.

Indice	Ambam	Pucallpa	Pedro Peixoto	Theobroma	Yurimaguas	Yaoundé	Lampung
NPc2	Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey	Black	Light Grey	White
DLFDp	Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Dark Grey	Black	Dark Grey	Black
%LANDc1	Black	Dark Grey	Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey	White
Mlc1	Light Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey	Dark Grey	Dark Grey	Black
MPlc1	Black	Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Dark Grey	White	White
MPSc2	White	Light Grey	Dark Grey	Dark Grey	Light Grey	Dark Grey	Black
MNNc1	Dark Grey	Dark Grey	Black	Dark Grey	Light Grey	Dark Grey	Light Grey

Le grisé des cellules est d'autant plus foncé que la valeur de l'indice est grande.

Tableau 19. Comparaison des indices spatiaux sur les sites d'étude de la déforestation (source : Imbernon, Cirad).

Du point de vue de la complexité des paysages, les sites de Lampung et Yurimaguas se distinguent par une dimension fractale élevée (Fig. 98). A l'inverse, Pedro Peixoto a l'indice fractal le plus faible ce qui signifie que les formes des patches sont relativement simples.

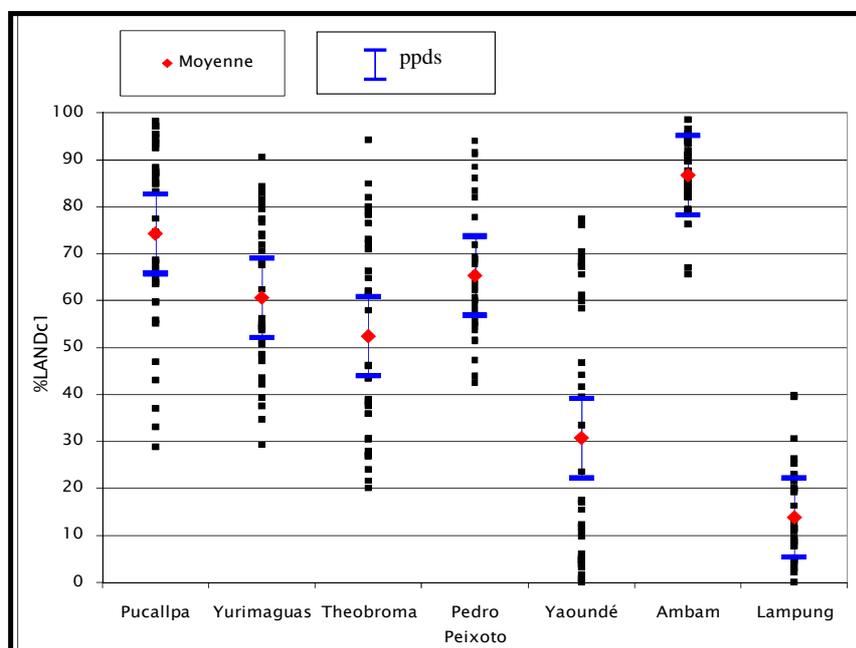


Figure 97. Pourcentage de forêt par cellule sur chaque site (source : Imbernon, Cirad).

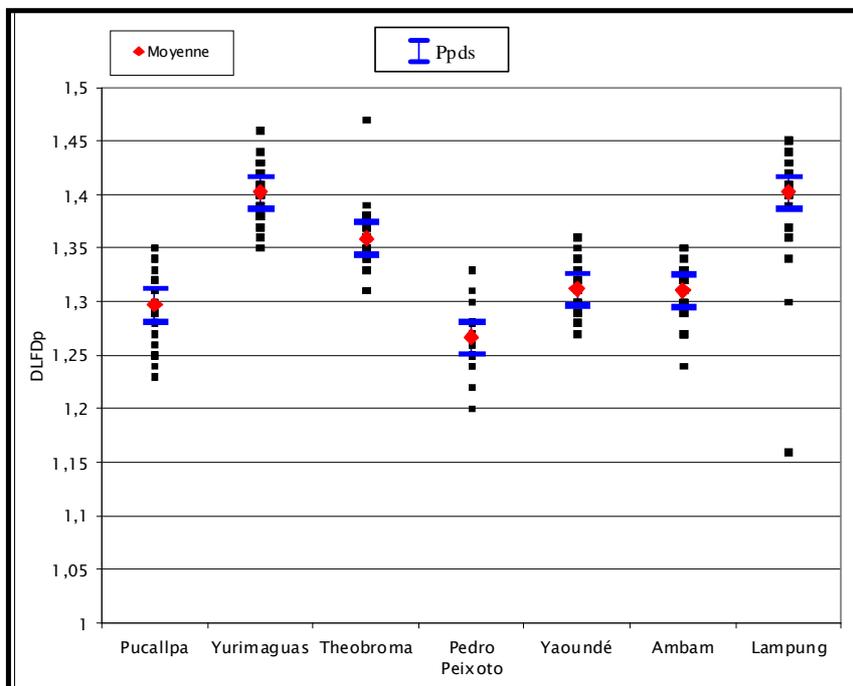


Figure 98. Dimension fractale par cellule sur chaque site (source : Imbernon, Cirad).

### Etude de la variabilité interne des sites

En cartographiant la variabilité interne des indices par maille, il est possible de différencier des motifs différents à l'intérieur même d'une image. Cette variabilité spatiale est représentée ci-dessous sur le site de Pedro Peixoto au Brésil (Fig. 99) : elle est importante pour la plupart des indices.

A partir de cette cartographie de la variabilité spatiale des indices, quatre motifs de paysage peuvent être différenciés. De cette manière, il est possible de réaliser le zonage de l'espace représenté sur la Figure 100.

- Le **motif 1** correspond aux zones presque entièrement couvertes de forêt (80 à 95 % de la surface), donc aux zones où le processus de déforestation est encore faible.
- Le **motif 2** correspond à l'emprise de la route principale (de couleur rouge sur la carte). Il est caractérisé par une taille moyenne des patches de domaine agricole élevée (supérieure à 20 ha).
- Le **motif 3** se différencie par une taille moyenne des patches de domaine agricole plus faible que le motif 2 et un pourcentage de forêt supérieur. Il correspond au réseau routier secondaire.
- Le **motif 4** se différencie par une taille des patches de domaine agricole très faible. Il se situe autour des ramifications tertiaires du réseau routier.

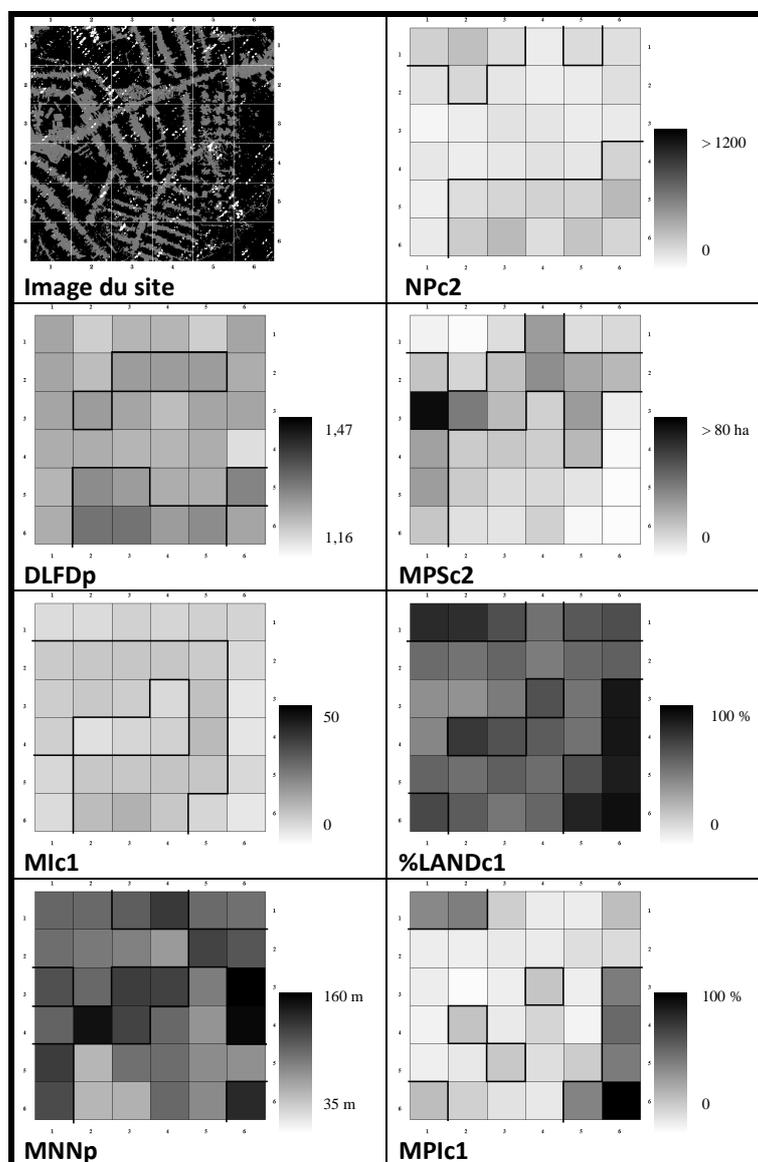


Figure 99. Variabilité interne des indices spatiaux du site de Pedro Peixoto - (Brésil)  
(source : Imbernon, Cirad).

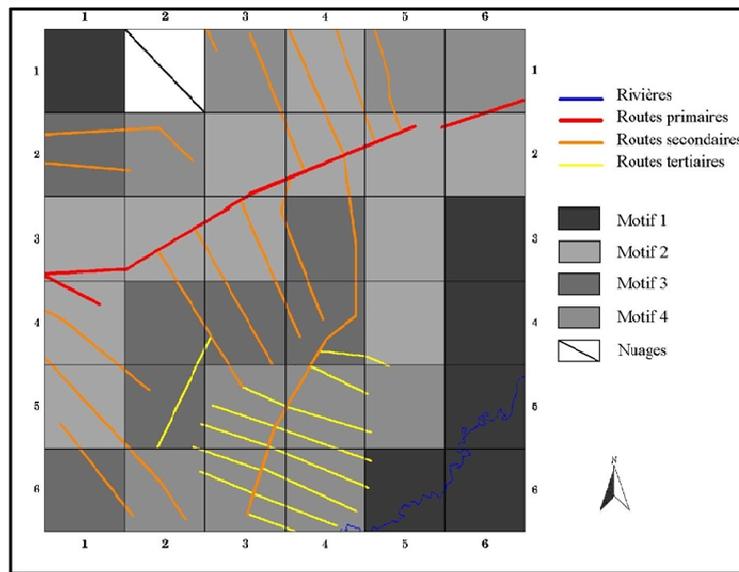


Figure 100. Zonage de l'espace en motifs de paysages sur le site de Pedro Peixoto – Brésil (source : Imbernon, Cirad).

L'analyse de la diversité de ces indices sur ce site de déforestation en Amazonie brésilienne représente donc bien les processus en jeu observés au sol, en relation avec un des éléments structurants majeurs de ce paysage : le réseau routier en arêtes de poissons (*fish bone pattern*). C'est cette mise en relation entre des indicateurs mathématiques et la « réalité terrain » qui est l'enjeu majeur de ce type d'analyse.

#### Analyse des paysages de déforestation à partir des indicateurs spatiaux

L'analyse des indices quantitatifs issus de l'« écologie du paysage » permet de différencier et de comparer les paysages des différents sites de déforestation avec une relative objectivité et surtout d'une manière reproductible, à condition que les données d'origine soient de même résolution spatiale.

##### *Le site de Pucallpa*

Le site de Pucallpa se distingue par un fort pourcentage de forêt, un indice de proximité élevé et un indice de Matheron relativement faible. Les autres indices restent proches de la moyenne entre les sites. Ce site de Pucallpa reste toutefois difficile à caractériser du fait de sa forte variabilité interne : certaines zones sont en grande partie couvertes de forêt (plus de 90 % de la surface), alors que les zones autour de la route Federico Basadre et de la rivière Rio Aguaytía ont des taux élevés d'occupation agricole.

En général, les zones forestières sont perforées de petits patches de domaine agricole, de taille inférieure à 1,5 ha. Vers la rivière Aguaytía (à l'opposé de la route), les patches de domaine agricole sont un peu plus grands (3 à 6 ha) ; ils sont aussi plus nombreux et plus proches. Le paysage de Pucallpa présente donc tantôt une matrice forestière trouée de petits patches de domaine agricole, tantôt une matrice agricole avec

quelques rares fragments de forêt résiduelle. Mais globalement, le paysage de ce site est faiblement fragmenté.

#### *Le site de Yurimaguas*

Le site de Yurimaguas se distingue par un nombre de patches de domaine agricole, un indice de Matheron et un indice fractal élevés, alors que l'indice de plus proche voisin est très faible. Ce site présente un paysage semi-forestier - la forêt occupe 61 % de l'espace -, mais relativement différent suivant les zones. Près des rivières (en particulier la rivière Huallaga) et de la ville de Yurimaguas, le domaine agricole domine et la forêt est très fragmentée (indice de Matheron très élevé). Mais le nombre élevé de patches de domaine agricole partout dans cet espace entraîne une fragmentation plus élevée que sur les autres sites. La taille moyenne de ces patches agricoles n'excède jamais 10 ha, même avec un taux de couvert forestier inférieur à 30 %. Ceci est lié aux nombreux reliquats de forêt entre les espaces agricoles et au sein même des exploitations agricoles. La forte valeur de l'indice fractal indique que les formes géométriques de ce paysage sont complexes.

#### *Le site de Pedro Peixoto*

Il se différencie par un faible indice de Matheron, un faible indice fractal, une forte distance au plus proche voisin, un faible nombre de patches de domaine agricole et une taille importante des patches de domaine agricole. Ce site, majoritairement occupé par la forêt, est fortement structuré par le réseau routier. Il présente des formes géométriques plus simples que les autres sites, aussi bien pour les patches de forêts que pour les patches de domaine agricole (faible indice fractal). Le faible indice de Matheron nous indique également que la forêt est très peu fragmentée. Les patches sont relativement grands et les transitions avec le domaine agricole sont nettes, même lorsque la forêt n'occupe que 40 % de l'espace. Dans le domaine agricole, les patches ont une taille importante (près de 14 ha en moyenne) et ils sont peu nombreux. De petites zones forestières ont un paysage fragmenté par de nombreux petits patches de domaine agricole.

#### *Le site de Theobroma*

Il se distingue par une dimension fractale élevée, un faible pourcentage de forêt et une taille élevée des patches de domaine agricole. Mais le sud et le nord de ce site sont très différents. De grands patches de domaine agricole (> 15 ha) et un faible couvert forestier (30 % en moyenne) caractérisent la partie sud du site. La partie nord est forestière ; la forêt est peu fragmentée au nord-ouest, et plus fragmentée au nord-est avec des patches de domaine agricole.

#### *Le site d'Ambam*

Il présente un pourcentage de forêt, un indice de proximité, une distance au plus proche voisin et un nombre de patches de domaine agricole très élevés, alors que la taille moyenne des patches de domaine agricole et l'indice de Matheron sont faibles. Ce paysage est peu fragmenté comparativement aux autres sites car la forêt y occupe une très grande proportion de l'espace. Elle est trouée par de petits patches de domaine agricole, dispersés et distants (fort indice du plus proche voisin). L'étude de la variabilité interne de ce site montre une structuration du paysage par les routes le long desquelles l'installation humaine s'est faite à peu près uniformément. Ainsi le long des routes, les patches de domaine agricole sont plus proches et de dimension

plus importante (1,5 à 3 ha) qu'ailleurs. Loin des routes, les patches agricoles sont dispersés, de petite taille (inférieure à 1,5 ha) et distants les uns des autres.

#### *Le site de Yaoundé*

Ce site se différencie par un faible pourcentage de forêt, un faible indice de proximité, une taille importante des patches de domaine agricole et un indice de Matheron relativement élevé. De fortes disparités existent toutefois entre l'est et l'ouest du site. La partie ouest, qui correspond notamment à la ville de Yaoundé, est peu forestière : la forêt y est fragmentée et dispersée dans le domaine agricole. A l'est, le couvert forestier est majoritaire et le domaine agricole est formé de patches de taille moyenne (3 à 6 ha). Entre ces deux zones, la transition est relativement brutale. Enfin, au nord, apparaissent des paysages de savane, avec tantôt des reliquats de forêt (l'indice fractal est alors particulièrement élevé), tantôt des patches de domaine agricole.

#### *Le site de Lampung*

Ce dernier site se distingue par un faible nombre de patches de domaine agricole et des indices de plus proche voisin et de pourcentage de forêt faibles, alors que l'indice de Matheron, l'indice fractal et la taille moyenne des patches de domaine agricole sont élevés. Ce site de Lampung n'est plus forestier (seulement 14 % de la surface), et le domaine agricole occupe la plus grande partie de l'espace. La taille moyenne des patches de domaine agricole est élevée (40 ha en moyenne). De grands patches uniformes (17) d'une taille moyenne de 3 300 ha correspondent aux plantations agroindustrielles. La forêt n'est plus présente que le long de la rivière Tulang Bawang et de ses affluents et elle y est très fragmentée (indice de Matheron élevé).

### **Analyse spatio-temporelle des indices spatiaux sur le site de Theobroma**

Nous disposons sur cette commune de l'Etat du Rondonia au Brésil d'une série d'images satellitales allant du début de la colonisation de l'espace forestier en 1973 jusqu'en 1996, date de la dernière image disponible au moment de l'étude. Cette série d'images est illustrée sur la Figure 101 et montre l'évolution du paysage de cette commune.

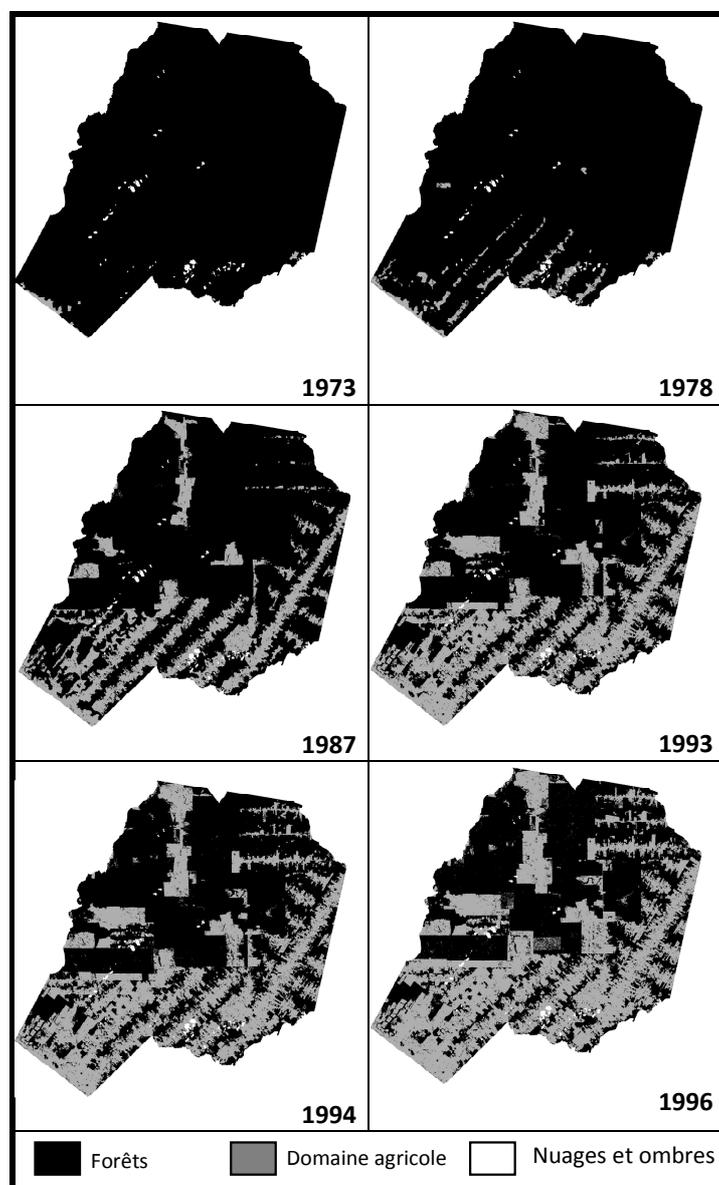


Figure 101. Séquence d'images satellitaires de 1973 à 1996 sur le *município* de Theobroma au Brésil (source: Imbernon, Cirad).

Analyse visuelle de l'évolution du paysage de Theobroma

- En 1973, la forêt couvre la quasi-totalité de la commune. Quelques rares patches déforestés sont visibles le long de la route principale, au sud-ouest de la commune.

- En 1978, des patches de domaine agricole apparaissent au sud de la commune à partir de la route principale. Ces patches sont distribués dans le sens sud-ouest/nord-est. Ils forment des lignes parallèles, espacées à intervalles réguliers, qui correspondent au réseau routier secondaire.

- En 1987, les changements sont importants. Le domaine agricole s'est étendu au sud le long des routes secondaires, et le processus de déforestation a débuté au nord. Les « arrêtes de poisson » («*fishbone pattern*») du domaine agricole sont désormais continues et se sont épaissies. On note au nord l'apparition de nouvelles routes de pénétration dans la forêt et de trois patches agricoles isolés et de très grande dimension.

- En 1993, les patches de domaine agricole se sont étendus et quelques grands patches sont visibles dans le centre et le centre-est. Le contraste est fort entre le nord-ouest avec de grands patches plus ou moins jointifs dans une matrice de forêt et le reste de l'espace au sud et est avec un paysage agricole en arêtes de poisson.

- En 1994, les patches agricoles se sont étendus et de petits patches de domaine agricole apparaissent dans le quart nord-ouest de la commune.

- En 1996, les patches se sont encore agrandis et dans le quart nord-est de nouveaux grands patches agricoles apparaissent. Ailleurs, de nombreux petits patches se sont agrégés pour former des patches de grande dimension.

L'analyse visuelle permet facilement de décrire l'évolution du paysage de cette commune de l'Etat de Rondonia où, en seulement 23 ans, la forêt qui couvrait la totalité de l'espace a été transformée en un espace agricole qui domine largement le paysage. L'analyse visuelle permet aussi de différencier deux zones : le nord-ouest avec de grands patches rectangulaires plus ou moins jointifs, correspondant à de grandes fazendas d'élevage s'étendent ; le sud-est avec un motif en « arrêtes de poisson », traduisant le processus de colonisation par les petits agriculteurs colons, qui s'épaissit et s'anastomose (Fig. 102). Cette analyse visuelle est donc riche d'informations sur les paysages et les processus d'évolution. Mais pour aller au bout de la démarche sur une approche quantitative des paysages, j'ai cherché à m'affranchir de la subjectivité de l'analyse visuelle en utilisant les indicateurs spatiaux pour analyser l'évolution de ce paysage.

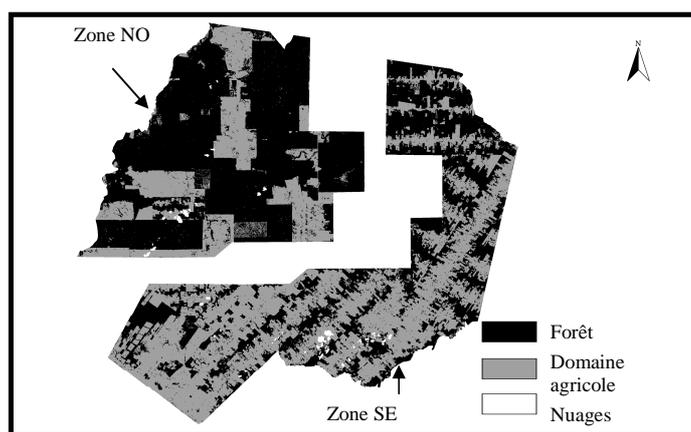


Figure 102. Zonage du *município* de Theobroma en 1996 (source: Imbernon, Cirad).

### Analyse quantitative de l'évolution du paysage de déforestation de Théobroma

A titre d'exemple et pour ne pas complexifier l'analyse, je ne présente ici que l'évolution temporelle de trois indices : l'indice de Matheron, la taille moyenne des patches de forêts et la distance au plus proche voisin des patches de domaine agricole.

#### *- Evolution de l'indice de Matheron*

L'indice de Matheron (MI) augmente entre 1973 et 1993 (Fig. 103) et cette augmentation est beaucoup plus forte dans la partie SE que dans la partie NO du municpio. Cela indique que le paysage se fragmente et que le processus est plus important dans la partie SE que dans la partie NO du *município*.

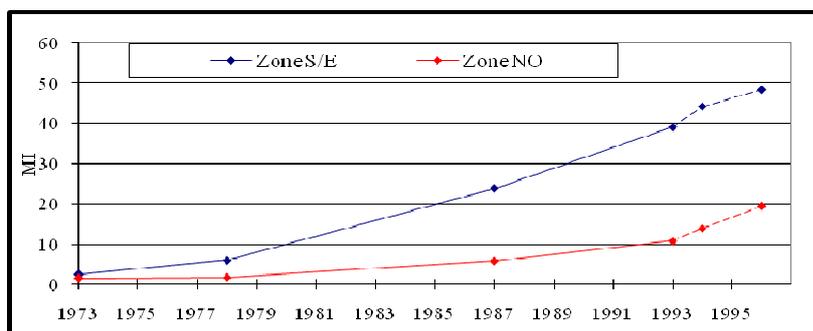


Figure 103. Evolution de l'indice de Matheron des patches de forêts du site de Théobroma – Brésil (source : Imbernon, Cirad).

#### *- Evolution de la taille moyenne des patches de forêts*

La taille moyenne des patches de forêt (MPSc1) diminue fortement dans les zones SE et NO (Fig. 104) et elle reste légèrement supérieure dans la partie NO du site. La taille moyenne des patches de forêt passe d'environ 50 000 hectares en 1973 à 10 hectares en 1996. Ces moyennes cachent cependant des valeurs extrêmes. Ainsi en 1978, un seul patch de forêt occupait 160 800 ha correspondant à 96 % de la couverture forestière : il constituait la matrice du paysage. En 1996, le patch de forêt le plus grand représente encore 55 % de la surface de forêt, mais la plupart sont de petite dimension.

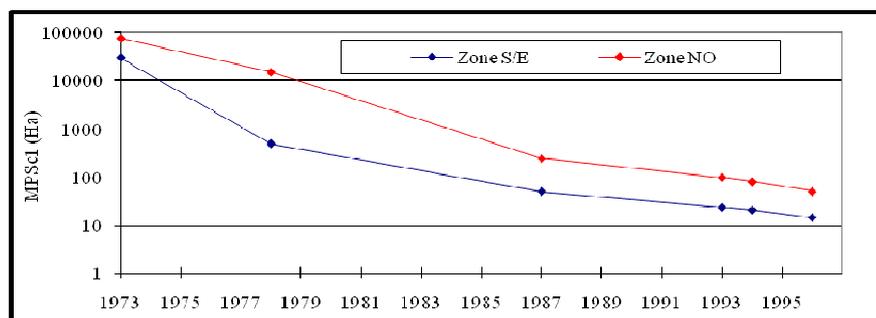


Figure 104. Evolution de la taille moyenne des patches de forêt du site de Théobroma - Brésil (source : Imbernon, Cirad).

*- Evolution de la distance au plus proche voisin des patches de domaine agricole*

En 1973, la distance au plus proche voisin des patches de domaine agricole (MNNc2) est élevée dans la partie sud-est du site (Fig. 105), alors qu'il n'y a pas d'indice pour la partie NO car cette zone est encore entièrement forestière. De 1973 à 1978, la distance au plus proche voisin baisse fortement dans la partie SE : les patches de domaine agricole deviennent très proches. Elle reste élevée en 1978 dans la partie NO, mais baisse ensuite rapidement entre 1978 et 1987. Le paysage agricole s'étend et les patches agricoles s'anastomosent.

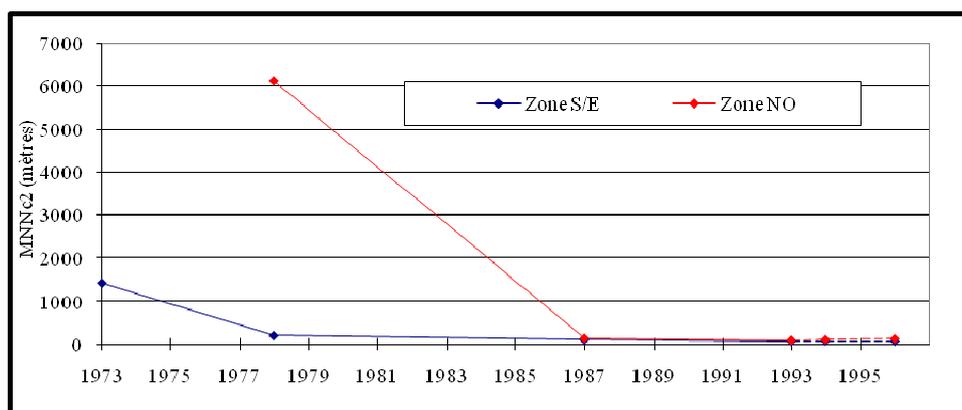


Figure 105. Evolution de la distance moyenne au plus proche voisin des patches de domaine agricole du site de Théobroma – Brésil (source : Imbernon, Cirad).

Avantages et limites de l'analyse quantitative de la dynamique du paysage

Cette analyse quantitative de la dynamique du paysage sur le *município* de Théobroma permet de quantifier l'évolution de la taille des patches, de leur complexité géométrique et de leur proximité, ce que ne permettait pas l'analyse visuelle. L'évolution de ces indices traduit bien la dynamique de ces paysages de déforestation : dégradation du couvert forestier et fragmentation du paysage, complexification des formes des unités de paysage et anastomose des parcelles agricoles.

Mais cette analyse quantitative comporte aussi des limites. Tout d'abord, cette analyse est fortement dépendante de la résolution spatiale des capteurs utilisés et du degré de détail de la représentation cartographique réalisée à partir de ces images. L'utilisation de capteurs satellitaires différents ou de cartographies de sources différentes va créer un biais dans les données analysées.

Surtout, et c'est le point sur lequel j'ai eu le plus de difficulté, cette approche fournit des indices parfois difficiles à interpréter, comme c'est le cas avec les indices fractals, et ces indices ne donnent qu'une idée abstraite de la complexité des paysages. Il n'est donc pas facile de donner du sens à tous ces indices mathématiques pris conjointement. Leur intérêt majeur à mon sens est de conforter les hypothèses et les analyses faites par l'analyse visuelle.

Je vais le montrer en suivant un autre exemple d'analyse spatiale, plus simple et finalisé (intégré dans un projet) qui a utilisé un indicateur de fragmentation et le calcul de la connectivité d'un paysage

### 3.3 Fragmentation et connectivité des forêts dans le corridor biologique méso-américain

La région méso-américaine commence dans le Darién à Panama et se prolonge jusqu'à la forêt Maya (Selva Lacandona) dans le sud du Mexique, en traversant le territoire de 8 pays. Dans cet espace vivaient plus de 40 millions de personnes en l'an 2000, et sa population devrait pratiquement doubler d'ici 2025. Cet isthme entre les deux continents comporte environ 20 000 espèces de flore sur les 250 000 décrites au niveau mondial et cette diversité biologique a incité à établir en juillet 1997, lors du XIXe sommet des Présidents d'Amérique centrale, un Corridor biologique méso-américain (CBM) qui traverse l'ensemble de la région (voir Fig. 106). Les zones de ce corridor ont été sélectionnées pour leur potentiel sylvicole (forêts situées en dehors des zones protégées, zones pentues et pierreuses, rivières et plans d'eau pouvant tirer profit de mesures de conservation, lieux pouvant servir d'abri et de refuge à des vertébrés), ou pour leur couvert arboré réel (forêts en cours d'exploitation, plantations de café avec arbres d'ombre, etc.).

La proposition de Corridor biologique méso-américain (en orange sur la Fig. 106) couvre 321 103 km<sup>2</sup> dont 48,7 % de zones protégées, et 3,9 % de zones proposées pour la protection, et 47,4 % de zones de cultures, d'élevage et d'activités forestières où des interventions écologiques sont proposées. Cette proposition de corridor pourrait permettre de protéger 10 écorégions dans un état critique (7 % de la zone) situées sur le versant du Pacifique, 8 écorégions menacées (28 % de la zone) au Costa Rica et au Guatemala, 4 écorégions dans un état vulnérable (53 % de la zone) sur la côte de la mer des Caraïbes, et enfin 8 écorégions dans un état relativement stable (12 % de la zone)<sup>62</sup>.



Figure 106. La proposition de corridor biologique méso-américain dans l'isthme centraméricain (source : corridor biologico meso-americano).

<sup>62</sup> Corrales L., Zuñiga T., 2001. *Análisis de Representatividad Ecológica del Corredor Biológico Mesoamericano*. CBM. Managua, Nicaragua. 10 p.

El Salvador fait partie de cet isthme et le Corridor biologique mésoaméricain traverse son territoire. Le pays est limité à l'ouest et au nord-ouest par le Guatemala et au nord par le Honduras (Fig. 107). Au sud, le pays est ouvert sur l'océan Pacifique et au sud-est le golfe de Fonseca le sépare du Nicaragua. El Salvador est un pays complexe du point de vue de la géologie et du relief (présence de chaînes volcaniques), et ses paysages offrent de nombreux contrastes (Photos 14).

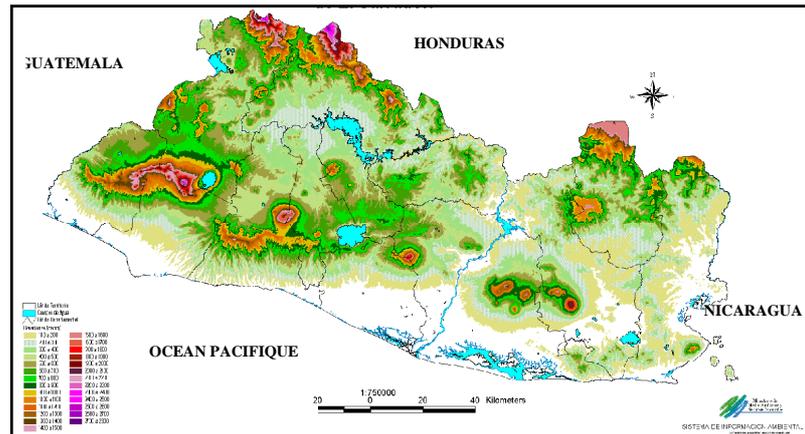
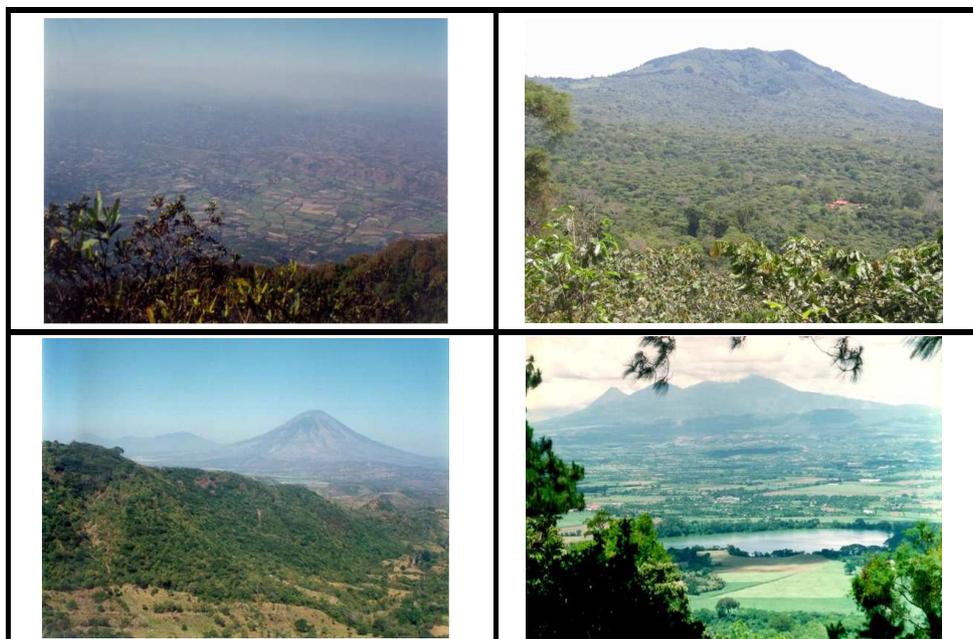


Figure 107. Limites géographiques et reliefs d'El Salvador (source: Imbernon, Cirad).



Photos 14. Paysages d'El Salvador : côte pacifique (hg), chaîne montagneuse du nord (hd), chaîne volcanique du centre (bg) et vallée centrale (bd) (source : Imbernon, Cirad).

El Salvador est de plus un des Etats les plus densément peuplés d'Amérique centrale avec environ 7 millions d'habitants sur seulement 20 000 km<sup>2</sup>. Le territoire est donc soumis à une forte pression humaine.

Les forêts du pays se situent principalement sur les reliefs ou dans les plantations de café sous ombrage qui constituent des agroforêts. Sur l'ensemble du territoire national, les forêts sont fragmentées et la connectivité n'est pas assurée. Pour analyser la fragmentation et la connectivité des forêts d'El Salvador, la carte d'occupation des terres Corine Land Cover (CLC) dont j'ai coordonné la réalisation à l'échelle 1 : 50 000 sur l'ensemble du territoire d'El Salvador a été utilisée.

La nomenclature initiale de cette carte comportait 14 types de forêts ; elle a été simplifiée et seules les huit classes de forêt les plus représentatives sont conservées. Les statistiques issues de cette cartographie (Tableau 20) donnent 396 706 ha de forêt (environ 19 % de la superficie totale) et 220 908 ha d'agroforêt à base de café (environ 10 %).

Couvert forestier	Superficie (ha)	% total	% de pays
Conifères	73 997	19	3,5
Mixte	17 704	4	0,8
Mangroves	39 027	10	1,9
Plantations	5 344	1	0,3
Galleries	18 499	5	0,9
Caducifoliés	108 065	27	5,1
Sempervirente	23 960	6	1,1
Mixtes semi-caducifoliés	110 111	28	5,2
<b>Total forêts</b>	<b>396 706</b>	<b>100</b>	<b>18,8</b>
<b>Café sous ombrage</b>	<b>220 908</b>	-	<b>10,5</b>

Tableau 20. Statistiques de la couverture forestière en El Salvador (source: Imbernon, Cirad).

## La fragmentation du couvert forestier

### Méthode d'analyse de la fragmentation

Plusieurs indices de fragmentation du paysage ont été calculés sur l'ensemble du territoire national à l'aide du logiciel Fragstats. Toutefois pour simplifier l'analyse, un seul indicateur a été utilisé ici : la densité de patches DP. Cet indicateur est simple à calculer, facilement compréhensible et il traduit bien la fragmentation du paysage (Fig. 108).

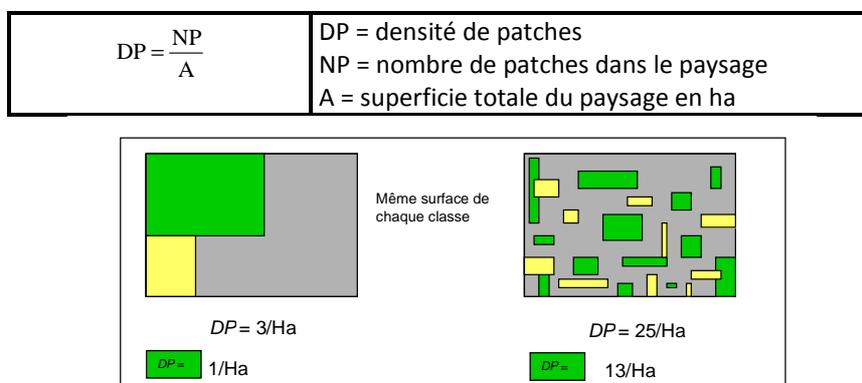


Figure 108. Deux indices de densité de patches dans deux paysages ayant la même surface pour chacune des classes, mais une fragmentation différente (source : inconnue).

Cet indice de fragmentation DP, une fois calculé, a été représenté dans les limites de confiance à 5 % ( $\alpha = 5\%$ ) de la distribution statistique, avec un minimum (DP<sub>min</sub>) de 0,004 et un maximum (DP<sub>max</sub>) de 0,072. Ensuite, l'indice a été classé en trois catégories :

- fragmentation basse :  $DP \leq DP_{\min.}$  ;
- fragmentation moyenne :  $DP_{\min.} > DP < DP_{\max.}$  ;
- fragmentation haute :  $DP \geq DP_{\max.}$  .

#### Analyse de la fragmentation du couvert forestier

Les statistiques réalisées sur l'indicateur (DP) et sa classification montrent que 26 % (81 346 ha) du couvert forestier présentent une fragmentation haute et 54 % du couvert forestier (plus de la moitié) une fragmentation intermédiaire. Cette fragmentation est observable sur l'ensemble du territoire, mais les fragmentations les plus élevées se situent dans les zones où il y a le moins de forêts (zone centrale et sud du pays) : c'est là de fait que les forêts sont les plus vulnérables (Fig. 109).

L'analyse des statistiques par types de forêt montre (voir Tableau 21) que la fragmentation est élevée pour les forêts de galerie (73 %), les forêts mixtes (41 %) et les forêts sempervirentes (37 %). Ceci est dû au fait qu'il s'agit de reliquats de forêt de petite dimension, soumis à la pression humaine. Ces forêts sont fragiles et vulnérables, et elles tendent à disparaître. La fragmentation élevée des plantations monospécifiques (58 %) provient pour sa part de reboisements sur des parcelles isolées et de faible superficie.

Les forêts de mangrove, caducifoliées mixtes, semi-caducifoliées et de conifères présentent les indices de fragmentation les plus faibles : seulement 25 %, 14 %, 13 % et 11 % respectivement de leur superficie ont une fragmentation haute. Ces forêts sont sans doute les moins vulnérables à la pression de l'homme.

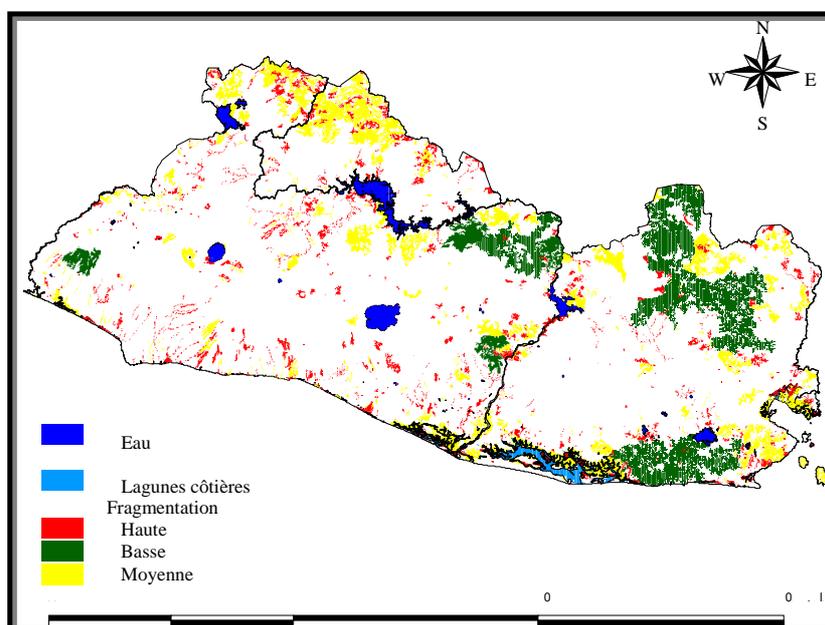


Figure 109. Fragmentation des forêts d'El Salvador en 2002 (source : Imbernon, Cirad).

Type de forêt	Superficie (ha)	% de fragmentation		
		Haute	moyenne	Basse
Conifères	73 997	11	46	43
Mixte	17 704	41	59	-
Mangroves	39 027	25	75	-
Plantations	5 344	58	42	-
Galerie	18 499	73	27	-
Caducifoliées	108 065	14	36	50
Sempervirentes	23 960	37	38	25
<b>Mixte semi-caducifoliées</b>	<b>110 111</b>	<b>13</b>	<b>36</b>	<b>51</b>

Tableau 21. Fragmentation du couvert forestier par type de forêt en El Salvador en 2002 (source : Imbernon, Cirad).

#### Méthode pour estimer la connectivité

Pour calculer la connectivité entre les patches de forêts (Fig.110a), les aires d'influence ('buffer') de chaque patch ont été calculées (Fig. 110b), et les distances choisies pour calculer ces buffers sont 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 et 2,5 km. Puis le noyau de ces buffers a été extraits par érosion de ces aires d'influence en utilisant les mêmes distances (Fig. 110c) et enfin seuls les patches et leurs connections sont conservés (Fig. 110d).

Une des difficultés dans cette approche est le difficile choix d'une distance et la justification scientifique de ce choix. En effet, la distance théorique de la connectivité devrait dépendre des processus de dispersion des espèces dans le paysage et donc des espèces étudiées. Dans cette étude sur la connectivité de la forêt, les distances utilisées ne correspondent pas à une espèce en particulier, mais elles restent de l'ordre de grandeur des distances utilisées qu'utilisent généralement les écologues.

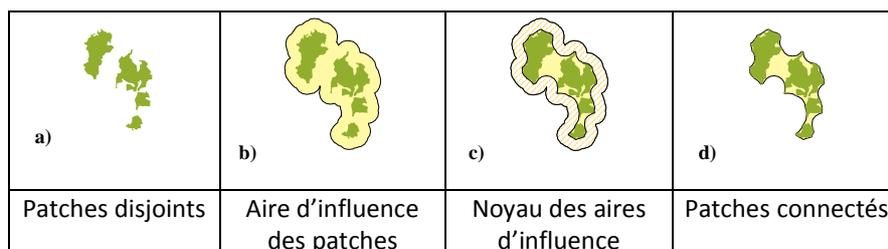


Figure 110. Calcul de la connectivité entre patches d'un paysage (source: Imbernon, Cirad).

Une fois ces connexions du couvert forestier établies, les barrières à la connectivité ont été identifiées : ce sont les zones urbaines et industrielles qui empêchent la dispersion des espèces ; mais nous avons aussi pris en compte les grandes parcelles de canne de sucre en monoculture. Enfin, à partir de la cartographie de cette connectivité du couvert forestier, les impacts négatifs ou positifs que pourraient provoquer de nouvelles interventions humaines sur cette connectivité ont été simulés. Deux scénarios ont été considérés ici : i) un scénario probable de disparition de la culture de café à basse altitude (« café de bajo » à moins de 800 m d'altitude) ; et ii) un scénario de régénération d'une aire ripicole entre les unités de conservation d'El Imposible et de Barra de Santiago.

#### La connectivité du couvert forestier

La connectivité du couvert forestier augmente avec la distance de connexion considérée : selon que l'on choisit une distance de 0,5 km ou de 2,5 km, les surfaces connectées passent du simple au double (Fig. 111).

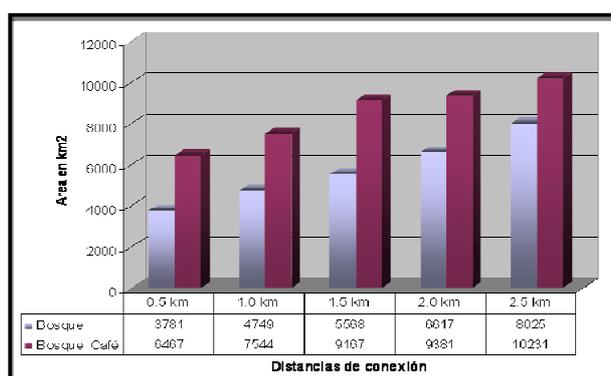


Figure 111. Comparaison des surfaces forestières connectées en fonction de la distance de connexion (source : Imbernon, Cirad).

Mais la connectivité s'accroît aussi considérablement avec prise en compte des agroforêts à base de café (Fig.112 a et b). Selon la distance de connexion prise en compte, la surface des forêts connectées augmente lorsque les agroforêts sont considérées de 71 % pour une distance de 0,5 km et de 27 % pour 2,5 km. La culture de café sous ombrage joue donc un rôle très important dans la connectivité du couvert forestier d'El Salvador et donc la constitution d'un corridor biologique.

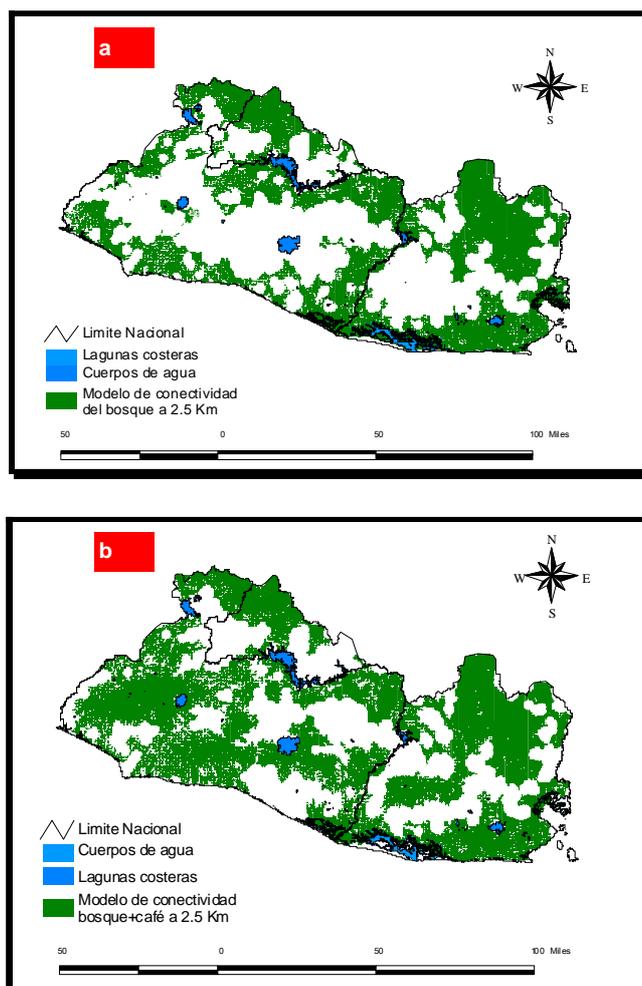


Figure 112. Connectivité a) des forêts et b) des forêts + agroforêts avec une distance de connexion de 2,5 km (source : Imbernon, Cirad).

En analysant plus en détail, il est possible d'identifier des points de passage («stepping stones») de cette connectivité au nord et à l'est du pays (voir Fig. 113) et de localiser ainsi des zones d'intérêt particulièrement important pour la connectivité. Ainsi, à l'est (dans le département de La Union), des forêts-galeries, longues et

étroites, apparaissent comme d'importants connecteurs entre des massifs forestiers. Si ces points de passage venaient à disparaître, la connectivité entre ces forêts serait interrompue. Il faudrait donc les préserver en priorité pour maintenir la continuité des corridors biologiques.

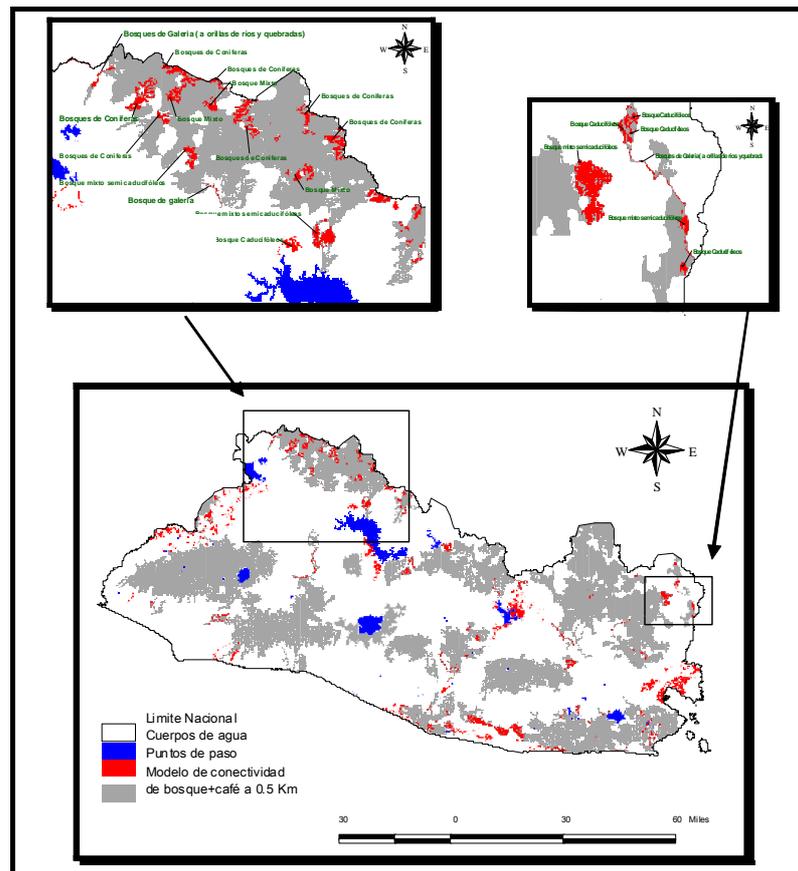


Figure 113. Points de passage entre les forêts d'El Salvador dans la région de Chalatenango (NW) et celle de La Union (NE) (source: Imbernon, Cirad).

### Connectivité du couvert forestier et proposition de corridor biologique méso-américain

La connectivité du couvert forestier calculée avec une distance de 2,5 km a été comparée à la proposition officielle de corridor biologique méso-américain. Sans prendre en compte les agroforêts, la comparaison fait apparaître de grandes différences dans la partie centrale et au nord du pays et de grandes zones du CBM ne sont pas connectées (Fig 114a). En prenant en compte les agroforêts à base de café, les deux cartes se superposent mieux (Fig. 114b) mais il reste des zones connectées dans la partie centrale du pays qui ne font pas partie de la proposition du CBM. De nombreuses zones au nord et à l'est du pays qui font partie de la proposition de CBM n'ont pas de forêts connectées selon cette analyse.

Quelle que soit la distance de connexion considérée, la différence entre la proposition du Corridor biologique mésoaméricain et la connectivité du couvert forestier reste importante (Tableau 22). L'intersection du CBM et de la connectivité avec les agroforêts montre ainsi que seulement 50 % environ du CBM (entre 41 % et 58 % selon la distance) seraient connectés.

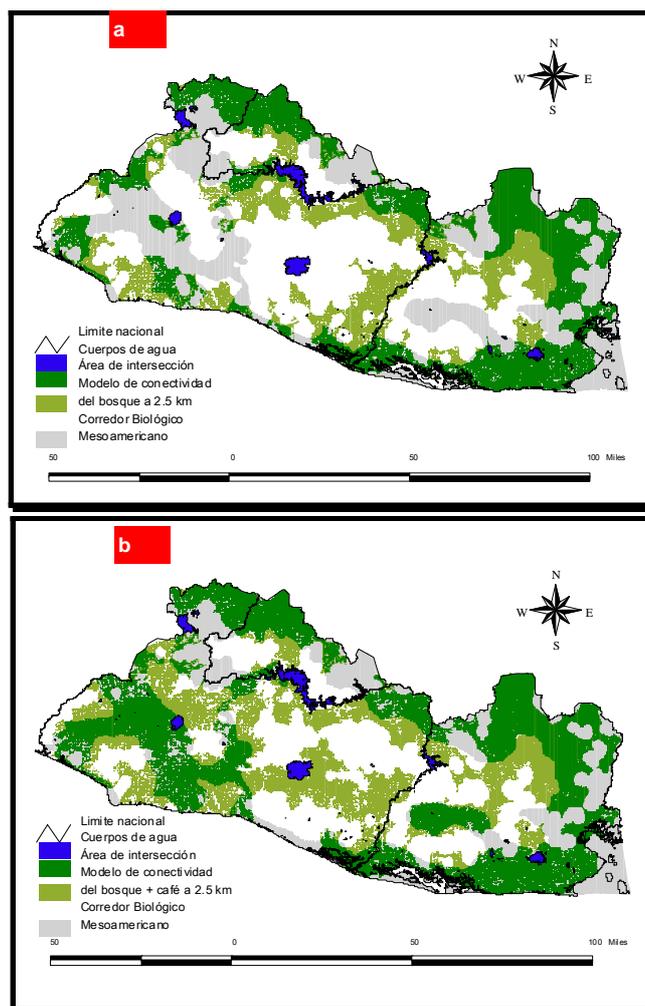


Figure 114. Superposition du corridor biologique méso-américain et de la connectivité à 2,5 km a) des forêts et b) des forêts et des agroforêts à base de café (source : Imbernon, Cirad).

Distance de connexion	Aire d'intersection des forêts		Aire d'intersection des forêts + agroforêts	
	Km <sup>2</sup>	% de CBM	Km <sup>2</sup>	% de CBM
0,5 km	2 821	26	4 492	41
1,0 km	3 455	32	5 117	47
1,5 km	3 963	36	5 842	53
2,0 km	4 483	41	5 986	55
2,5 Km	5 055	46	6 396	58

Tableau 22. Intersection entre le corridor biologique méso-américain et la connectivité des forêts pour différentes distances de connexion (source : Imbernon, Cirad).

Cette étude remet donc en cause en partie la proposition officielle du corridor biologique méso-américain. Elle a donné en tous cas des arguments au ministère de l'Environnement où j'étais positionné pour faire de nouvelles propositions au projet international.

#### Scénarios d'évolution du couvert forestier et impact sur la connectivité.

Le scénario de disparition du café à moins de 800 m d'altitude (café de « bajo ») est un scénario probable (voir § précédent). En croisant la carte d'occupation des sols et le modèle numérique de terrain, cette perte peut être estimée à 120 000 hectares de café. L'hypothèse la plus probable est que ces terres soient converties en cultures de grains de base (maïs et haricot) ou en zones urbaines.

La conversion potentielle de ces terres a été prise en compte dans l'analyse de la connectivité des forêts. Pour une distance de connexion de 0,5 km, elle entraînerait une perte de connectivité de 147 000 hectares sur un total de 646 700 hectares connectés, soit environ 22,7 % du corridor (Fig. 115). Un tel scénario aurait donc des impacts négatifs importants sur la connectivité du couvert forestier, et ce tout particulièrement dans la cordillère centrale du pays (les pertes de connectivité correspondent au vert foncé sur la Figure 115).

Un scénario positif a aussi été pris en compte. Il s'agit de la régénération de forêts-galeries le long des cours d'eau de la région d'El Imposible et Barra de Santiago, deux zones classées comme des « unités de conservation ». L'impact de cette régénération sur la connectivité montre que ces deux unités de conservation pourraient être connectées alors que pour le moment elles ne le sont pas (Fig. 116). L'exemple montre toute l'importance qu'ont ces forêts-galeries du point de vue écologique.

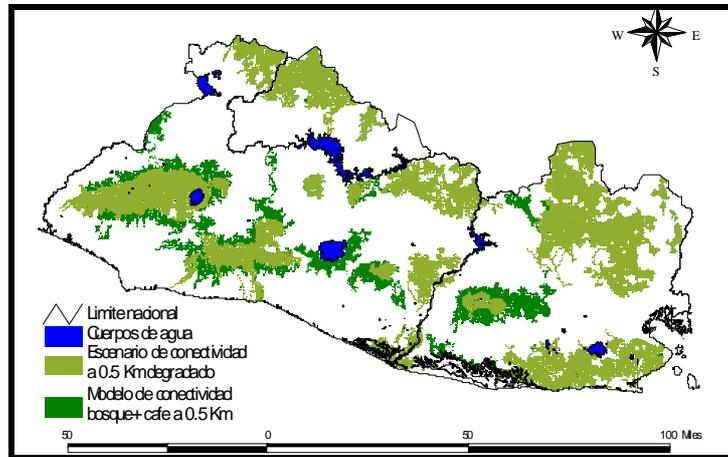


Figure 115. Impact de la disparition du café de « bajo » sur la connectivité du couvert forestier à 0,5 km (source : Imbernon, Cirad).

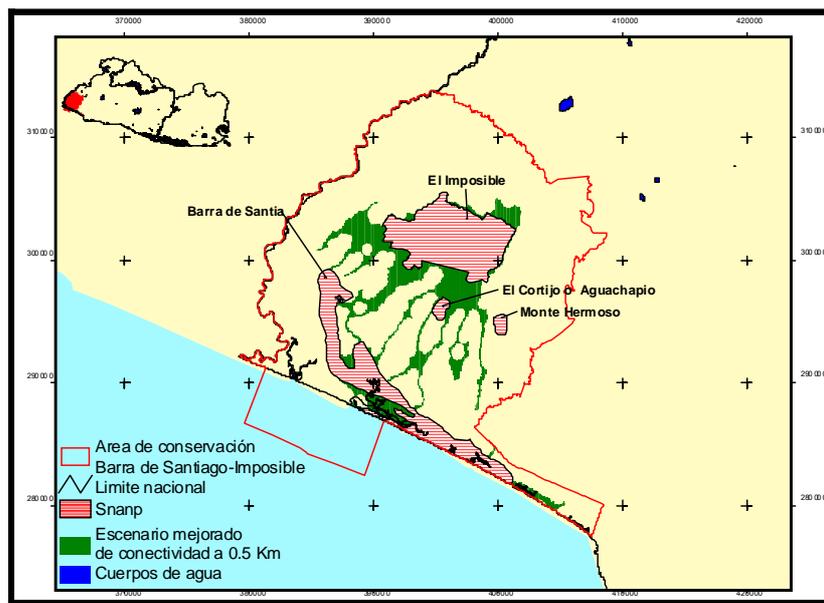


Figure 116. Impact de la régénération des forêts-galeries pour connecter les unités de conservation d'El Imposible et de Barra de Santiago (source : Imbernon, Cirad).

*Cet exemple clôt ici la présentation de mes travaux qui ont porté sur la fragmentation et la connectivité des paysages. Les deux exemples : fragmentation des frontières agricoles dans les grands bassins forestiers*

*tropicaux et fragmentation et connectivité des forêts dans le corridor biologique méso-américain montrent au moins que les concepts de l'écologie du paysage peuvent être appliqués et ont du sens. Ils mobilisent tous deux l'information issue de la télédétection spatiale et constituent un prolongement, une valorisation de ces informations.*

*Au travers de ces expériences, l'intérêt de ces concepts et des outils mathématiques qui en ont suivi apparaît important pour l'analyse géographique en général, et pour l'analyse des évolutions en cours concernant les formes d'agriculture ou les ressources naturelles. Il reste là, au moyen de ces concepts et méthodes, un immense potentiel de recherches pour caractériser les processus spatiaux et pour établir des comparaisons entre différentes régions du monde. Créer une base de données d'images satellitales homogènes sur un réseau d'observatoires répartis dans les diverses régions du monde permettrait de mieux comprendre l'évolution de notre planète avec des indicateurs quantitatifs.*

#### **4 Une nouvelle gamme de concepts et d'outils : les systèmes d'information en appui au développement territorial et à la gestion des ressources naturelles**

Produire de l'information spatiale à partir d'images de télédétection et analyser ces informations pour comprendre l'organisation ou l'évolution de territoires n'a de sens que si cette information est transmise à des « utilisateurs finaux » (*end-users*), acteurs de ces territoires. Or, pour traiter ces informations et les diffuser, les systèmes d'information ont développé des capacités qu'il était difficile d'ignorer. En particulier, les systèmes d'information à référence spatiale - les systèmes d'information géographiques - ont, par leurs fonctionnalités sans cesse améliorées, largement contribué à enrichir l'analyse spatiale et à intégrer différentes sources de données. Plus récemment, l'ouverture de ces systèmes sur le web a ouvert, par la rapidité de la circulation de l'information et l'ouverture à un public plus large, un nouveau champ d'applications. Ceci m'a amené à m'intéresser à ces systèmes d'information et à suivre leur évolution technologique, pour les intégrer au mieux dans mes activités de recherche. Ainsi j'ai utilisé certains de ces systèmes en appui au développement territorial et à la gestion des ressources naturelles.

##### **4.1 Des concepts liés au développement territorial**

Dans les domaines du développement, de nombreux concepts sont largement utilisés : développement territorial et développement durable, décentralisation et approche participative, systèmes d'information et gouvernance. Les écrits à ce propos sont nombreux et il n'est pas toujours aisé d'avoir une vision claire et partagée des concepts qui sont utilisés.

##### **Développement territorial et développement durable**

Le concept de développement territorial est apparu en France au milieu des années 1960 alors que les logiques sectorielles avaient dominé jusqu'alors. Mais l'Etat a alors une vision « descendante » sur l'aménagement du territoire : les décisions sont prises en haut lieu, sans concertation réelle avec les populations concernées. Dans les années 1970, en France, cette approche est remise en cause par les acteurs locaux qui prônent le développement local « par en bas » : c'est l'époque des « Pays » et du slogan « vivre, travailler et décider au Pays ». Dans les pays du Sud, ce n'est qu'à la fin des années 1980 que cette approche

de « développement local » commence à diffuser en complétant les mesures macro-économiques et les grands projets d'infrastructures.

Mais ce concept de développement territorial associe des composantes différentes selon les perceptions : développement rural, développement local, gouvernance décentralisée, gestion intégrée des ressources naturelles... Il englobe toutes ces composantes car il sous-entend à la fois une dimension sociale et politique, une dimension de développement et une dimension environnementale. En ce sens, il peut être rapproché d'un autre concept plus fameux: le « développement durable ».

Le concept de développement durable est issu du rapport Brundtland<sup>63</sup> (1987), il a d'une certaine manière contribué à politiser le débat sur les questions environnementales. Il propose de dépasser la contradiction entre écologie et économie, en considérant que croissance et protection de l'environnement peuvent être promues ensemble. Mais les moyens d'y parvenir ne sont pas explicités par ce rapport et le concept de développement durable apparaît donc davantage comme un cadre de débats. Certains considèrent même qu'il s'agit de « langue de bois politiquement correcte » ou de « pure rhétorique ». Force est de constater toutefois que le concept est de nos jours utilisé partout. Le monde de la recherche scientifique n'échappe pas à cette vague : on retrouve même le terme de développement durable dans la dénomination de laboratoires de recherche ou dans l'intitulé de projets de recherche. Cela est vrai surtout pour les sciences de l'environnement, que ce soit la climatologie, la géologie, l'hydrologie, la biologie végétale et animale, l'agronomie ou l'écologie. Cela est beaucoup moins vrai pour les sciences sociales : est-ce le fait que le poids donné aux sociétés et à l'homme dans ces recherches, ou est (ce un refus de se compromettre dans ce qui pourrait apparaître comme un effet de mode ou même un *lobbying* ?

Dans le rapport Bruntland, le concept de développement durable est articulé autour du triptyque de la durabilité écologique, de la viabilité économique et de l'équité sociale. Mais les géographes ont contribué à enrichir ce concept avec l'analyse des systèmes territoriaux et des raisonnements fondés sur les emboîtements d'échelles spatiales. Certains prennent du recul par rapport au concept et mettent en avant la grande diversité des lieux et des milieux en montrant qu'il n'y a pas « un » développement durable, mais « des » développements durables adaptés à chaque situation<sup>64</sup>.

L'absence de référence spatiale dans le concept est aussi un élément de blocage pour la géographie. Le leitmotiv de l'Agenda 21, « Penser globalement, agir localement », est la seule référence à l'espace. Elle exprime le fait que, même si le développement durable s'inscrit dans une prise de conscience à l'échelle planétaire, c'est aux échelles locales et régionales que peuvent être élaborées les politiques les plus efficaces<sup>65</sup>. Mais cette référence aux échelles, entre l'échelle planétaire et l'échelle locale, est beaucoup trop schématique pour traduire la complexité des interactions entre les échelles spatiales.

## Décentralisation

Le rôle de l'Etat dans les pays du Sud a été remis en cause dans les années 1980 par le renforcement des conditionnalités de l'aide au développement. C'est alors que la décentralisation a été prônée, mais le concept de décentralisation est lui-même suffisamment flou pour traduire les perceptions diverses des uns et des

<sup>63</sup> Brundtland Commission, 1987. *Our Common Future; Report of the World Commission on Environment and Development*. Published as Annex to General Assembly document A/42/427. p. 11-14.

<sup>64</sup> Veyret Y., Arnould P., 2008. *Atlas des développements durables*. Éditions Autrement, Paris. 96 p.

<sup>65</sup> Clement V., 2004. *Le développement durable : un concept géographique ?* Géoconfluences. URL : <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient.htm#1>

autres<sup>66</sup>. Aujourd'hui, la décentralisation dans les pays du Sud recouvre des réalités politiques, administratives et juridiques multiples. Mais surtout sa mise en œuvre dans ces pays se heurte à de nombreuses difficultés.

- ▶ La tentation de contrôle étatique demeure. De fait les leaders politiques envisageant souvent la décentralisation à la fois comme une opportunité, mais aussi comme une menace pour leur pouvoir.
- ▶ Le transfert de compétences reste souvent faible ou inefficace. En particulier, la maîtrise domaniale et foncière reste largement contrôlée par les Etats.
- ▶ Les budgets des collectivités locales sont le plus souvent dérisoires. Elles n'ont pas les capacités de prendre en charge le développement local.
- ▶ L'articulation entre les dynamiques locales et les institutions de l'Etat reste mauvaise. La communication et la compréhension entre les deux restent un problème.

## **Gouvernance**

Ce processus de décentralisation sous-entend le développement de relations entre les collectivités locales et l'Etat, et plus largement avec la société civile et les partenaires privés et publics, avec l'accès à des informations partagées. Pour faciliter cet accès, les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) et les Systèmes d'information (SI), peuvent sans doute jouer un rôle important et contribuer à la définition de politiques publiques de développement<sup>67</sup>.

Les Etats, dans les pays du Nord et maintenant dans les pays du Sud, utilisent ces technologies dans leurs différentes institutions. En France, les acteurs locaux se sont organisés en réseaux : pays, communautés de communes, agglomérations, et développent des capacités propres en matière de système d'information pour la gestion territoriale.

Dans les pays du Sud, les initiatives dans les collectivités locales sont beaucoup plus rares, si ce n'est inexistantes. Les systèmes d'information ne sont pas décentralisés et la FAO elle-même considère que les systèmes d'information agricole doivent être réorganisés pour favoriser la mise en œuvre de réseaux d'échange d'informations. Tout est donc à faire dans ce domaine et le champ de recherche et d'application est vaste.

Je vais présenter ici deux expériences de développement de système d'information menées au niveau local : l'une sur une commune d'Haïti et l'autre sur des communautés de communes situées une zone transfrontalière d'Amérique centrale.

### **4.2 Un exemple de système d'information pour une commune en Haïti**

En Haïti, la relation entre l'aménagement du territoire et la décentralisation a longtemps été occultée par les politiques d'ajustement structurel qui ne visaient que des objectifs à court terme. Mais lorsque je suis intervenu pour la FAO en Haïti en 2001, le discours dominant était devenu tout à coup celui de la décentralisation, seule garante du développement et de la démocratie. Dans cette nouvelle approche par la décentralisation se confrontaient d'une part une croyance dans l'efficacité économique et sociale de la

---

<sup>66</sup> Laurent P.J., Peemans J.P., 2006. *Les Dimensions socio-économiques du Développement local en Afrique au Sud du Sahara : Quelles Stratégies pour quels Acteurs ?* Bulletin de l'APAD, n° 15, Louvain-la-Neuve. URL : <http://apad.revues.org/document553.html>.

<sup>67</sup> Venturini M. M., 2005. Les TIC au service du développement territorial dans la construction et la transmission des savoirs. CEMAFORAD-2, Seconde édition : Université de Bejaia. p. 1-7.

proximité, avec une logique de subsidiarité comme moteur de l'organisation institutionnelle ; et d'autre part, une vision unilatérale des politiques territoriales menées par un Etat toujours fortement centralisé.

Lors de ma mission, cette opposition semblait toutefois dépassée (effet de mode ? ou pression des bailleurs de fonds ?). L'aménagement du territoire était un objectif, tandis que la décentralisation était le moyen de parvenir à cet objectif. Cette politique visait à redonner du souffle à la décentralisation par la définition d'une nouvelle architecture institutionnelle (elle restait à définir) et à trouver les voies d'un aménagement du territoire adapté aux réalités locales. Haïti était cependant confronté à de nombreux handicaps difficiles à surmonter.

- Les crises politiques successives avaient abouti à une déliquescence des institutions de l'Etat, à une fragilisation du cadre de vie et de l'environnement, à une réduction des investissements du secteur privé, et à un déplacement important de populations des campagnes vers les villes et vers les Etats-Unis.
- Les infrastructures et les services publics étaient fortement dégradés, la paupérisation de la population extrême, le chômage élevé et la décapitalisation des ménages quasi totale.
- Le risque de catastrophes naturelles (inondations, glissements de terrain, etc..) était élevé et la population très vulnérable (nous l'avons encore vu malheureusement avec le séisme de 2010).

Au niveau institutionnel, les carences étaient tout aussi nombreuses et fortes :

- la faiblesse des services chargés de l'aménagement du territoire et la dispersion de la gestion territoriale dans plusieurs ministères (MPCE, MICT, TPTC, MAS) ce qui la rendait inefficace ;
- une loi de décentralisation incomplète en ce qui concerne les assemblées départementales et les municipalités, dont le rôle et les pouvoirs n'étaient pas clairement définis ;
- une carence forte de moyens techniques, financiers et humains dans les collectivités territoriales.

C'est dans ce contexte donc, que ma mission visait à renforcer les capacités des autorités locales et des groupements de la commune de Marmelade située au nord d'Haïti, et à élaborer un plan communal de développement avec la participation des populations locales. Mais une des difficultés du projet lui-même venait de la juxtaposition d'enjeux endogènes et exogènes au développement de ce territoire.

D'une part, des institutions extérieures au territoire comme la FAO et l'Etat haïtien souhaitaient au travers de ce projet mieux organiser l'aménagement du territoire et rationaliser les interventions budgétaires. D'autre part, des leaders de la commune de Marmelade avec l'appui d'acteurs de la filière café étaient motivés par le développement économique et la captation du financement externe que représentait le projet de la FAO. De plus, les besoins des populations de la commune n'avaient pas été identifiés en amont du projet et leur participation à la mise en œuvre du projet risquait d'apparaître plus de l'ordre du discours « convenu » des bailleurs de fonds sur la participation (« pour » et « avec » les populations locales) que refléter une réalité de pratique sur le terrain. La conception d'un système d'information dans un tel contexte était soumise à ces contradictions et devait prendre en compte le plus possible les besoins de la collectivité locale.

### **Le cycle de conception du SI et ses étapes**

La conception du SI a suivi un cycle classique de projet, avec les difficultés habituelles que sont : i) l'identification précise des utilisateurs finaux du SI et de leurs besoins ; ii) la rareté de l'information « utile »

disponible ; iii) l'organisation sociale qui assurerait la maintenance du système ; et iv) les compétences et la formation des gestionnaires du système (Fig. 117).

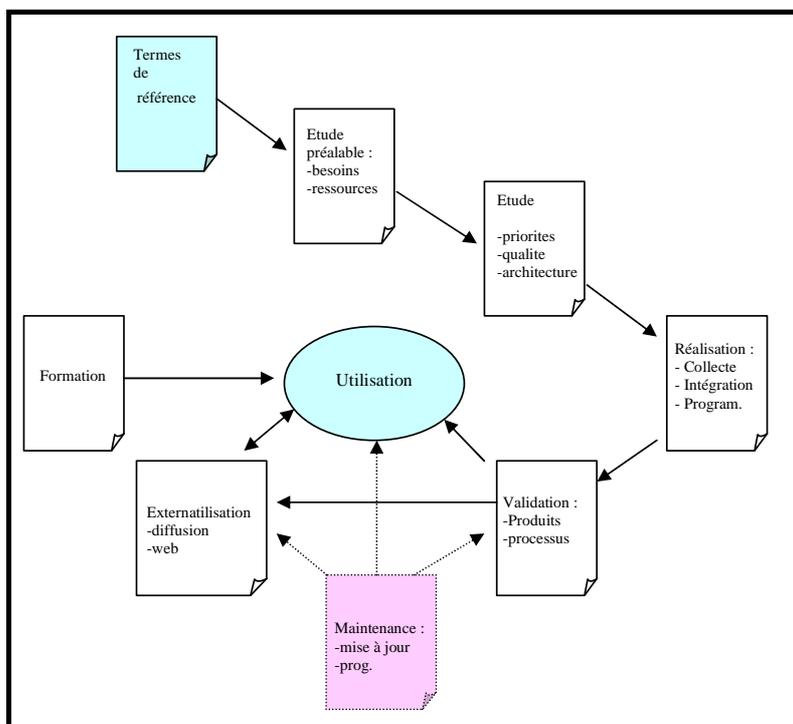


Figure 117. Principales étapes de la mise en œuvre du système d'information géographique de la commune de Marmelade en Haïti (source : Imbernon, Cirad).

Mais une des difficultés majeures de ce projet était la diversité des échelles spatiales à prendre en compte - du local (la commune) au régional (le département) - et la variété des thèmes à traiter : social, économique et environnemental.

#### *Le choix de l'unité spatiale*

Pour être utile dans l'élaboration du plan local de développement, le SI devait être réalisée sur la base d'unités socio-économiques, avec des échelles spatiales suffisamment fines pour permettre de décrire la variabilité du territoire. La commune de Marmelade, d'une surface de 115 km<sup>2</sup>, était divisée en trois sections communales, et les sections communales étaient elles-mêmes divisées en localités plus ou moins bien délimitées. Enfin, les localités comportaient des habitations qui correspondaient à des groupes d'habitations (des hameaux). Ces habitations portaient le nom de la maison la plus ancienne ou la plus influente, et elles dataient de l'époque coloniale. Elles étaient parfois mentionnées sur les cartes topographiques, mais elles n'étaient jamais délimitées.

Les données socio-économiques disponibles en Haïti se rapportaient le plus souvent à la commune et à la section communale, plus rarement à la localité et jamais à l'habitation. Pour le SI de Marmelade, c'est la localité, plus petite unité délimitée et renseignée, qui a été choisie comme unité socio-économique.

Pour la représentation cartographique de la commune, l'échelle 1/50 000e des cartes topographiques disponibles était insuffisante pour rendre compte de la variabilité du territoire. Elle ne permettait pas de localiser et de délimiter les différentes composantes biophysiques du territoire. Les photos aériennes disponibles (géoréférencées et mosaïquées par l'unité de télédétection et système d'information géographique de Port au Prince) auraient pu offrir cette possibilité (Fig.118), mais malheureusement la mosaïque de photos disponible ne couvrait que 18 km<sup>2</sup> sur les 115 km<sup>2</sup> de la commune.



Figure 118. Extrait d'une photographie aérienne prise en juillet 2000 sur la commune de Marmelade (source : UTSIG - ministère de la Planification).

Aussi une image du satellite IKONOS à 1 mètre de résolution, d'une qualité géométrique voisine de celle des photos aériennes, a été acquise par le projet FAO pour réaliser une cartographie détaillée de la commune. Le coût de cette image était élevé (environ 3 000 euros à l'époque), mais il était négligeable au regard du budget du projet de plusieurs millions de dollars US. De plus, au-delà de l'application envisagée, une telle image satellitale pouvait avoir des usages multiples pour les acteurs locaux, et en particulier pour leurs projets d'aménagements des bassins versants.

#### *Des échelles spatiales emboîtées*

Dans mes termes de référence, la FAO à Rome avait exprimé le besoin d'aborder différentes échelles spatiales pour mettre le projet de Marmelade dans une perspective régionale. De fait, l'architecture adoptée pour le système d'information était en « poupées russes » et se posaient des problèmes de cohérence entre les

échelles spatiales. Cette complexité était toutefois toute relative dans le cas de la commune de Marmelade dans la mesure où le nombre d'informations disponibles à chacune des échelles était limité.

#### *Un système à plusieurs entrées thématiques*

Le SI devait pouvoir traiter des données sur les unités territoriales, les organisations sociales, les bassins versants ou les filières de commercialisation des produits agricoles. Dans le traitement des données, ces niveaux d'analyse et d'action peuvent être considérés indépendamment. Mais pour la base de données, plusieurs modèles de données devaient être conçus et connectés.

### **La base de données**

#### *Les modèles conceptuels de données*

Pour représenter les entités, leurs propriétés et les relations entre elles, j'ai utilisé alors le formalisme UML des modèles conceptuels de données. Ce formalisme était peu utilisé encore à cette époque pour ce type d'application. Différents modèles de données ont été conçus pour le projet, correspondant à différents objets d'étude : territoires, bassins versants, associations, filières du charbon de bois et filières agricoles. Un de ces modèles est présenté ci-dessous à titre d'exemple : celui de la filière de charbon de bois (Fig. 119).

#### *Les données*

Tous les objets graphiques devaient être gérés par le logiciel MapInfo qui avait été acquis par la FAO pour le compte de la commune. La gestion des données tabulaires a été faite avec le logiciel Access, plus facile et plus performant dans la gestion des bases de données, et qui nous permettait de réaliser les formulaires de saisie et de *reporting*, comme celui concernant les sources inventoriées par habitations (Tableau 23). Pour la représentation cartographique, l'ensemble des cartes et l'image satellitale Ikonos ont été projetées dans le système UTM NASD 27 zone 18, utilisé par l'IGN d'Haïti. Les unités territoriales ont été indexées à l'aide des codes utilisés par l'Institut haïtien de statistiques (IHSI): X département, XX arrondissement, XXX commune, XXXX section communale.

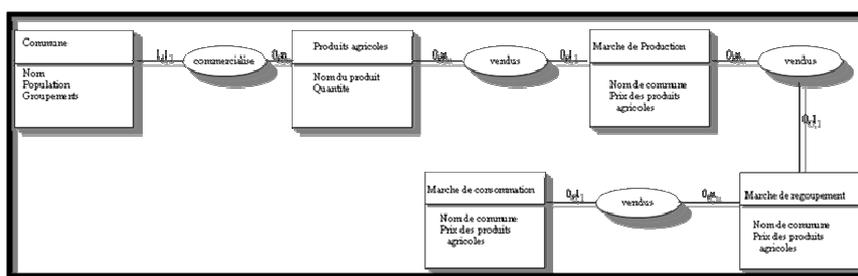


Figure 119. Modèle conceptuel de données de la filière du charbon de bois à Marmelade en Haïti (source: Imbernon, Cirad).

<i>localisation</i>	<i>section</i>	<i>Débit l/s</i>	<i>habitations bénéficiaires</i>	<i>P</i>	<i>Ca</i>	<i>A</i>	<i>Ci</i>	<i>F</i>
<b>Nan Mat</b>	Crete-a-pins	0.379	Nan Mat933	10	4	0	3	4
<b>Nan Rou</b>	Crete-a-Pins	0.07	Na Houe, De Mon, Coudre, Ba Nan Rou, Platon Rou584	1	7	0	1	1
<b>Barada</b>	Crete-a-Pins	1.893	Gauthier, Haut Barada	733	1	200	4	4
<b>Rabi</b>	Crete-a-Pins	0.189	Rabi	197	1	200	1	2
<b>Canal</b>	Crete-a-Pins	0.126	Canal	663	1	0	0	0
<b>Bas Madame</b>	Crete-a-Pins	0.11	Bas Madame	300	1	0	0	0
<b>Paticher</b>	Crete-a-Pins	0.3	Paticher, Bonneau, Glacis	354	1	300	2	3
<b>Gamin</b>	Crete-a-Pins	0.08	Genin, Ka Bisson, De Vila	624	1	200	1	2
<b>Mouscadi</b>	Crete-a-Pins	0.07	Mouscadi	287	1	0	0	0
<b>Gilbin</b>	Bassin	0.757	Gilbin	747	1	0	0	0
<b>Ca Matin</b>	Bassin	0.757	Ca Matin, La Folestre	686	1	350	2	3
<b>Paparel</b>	Crete-a-Pins	3.785	Nan Pont, Terre Blanche, Grandon	1454	1	140	4	5
<b>Medisan</b>	Bassin	0.189	Laritie, Cananette	1052	1	260	2	3
<b>Bilee</b>	Bassin	0.315	Bilee, Lamothe, Charette	2338	1	320	2	3
<b>Tenac</b>	Bassin	0.223	Tenac, Menyen	1180	1	450	2	3
<b>Dadeau</b>	bassin	0.06	Dadeau, Haut Bile, Haut Savane, Bas Savane	651	1	0	0	0
<b>Barade</b>	Bassin	0.05	Barade	258	1	0	0	0
<b>Bonne Terre</b>	Bassin	0.03	Bonn Terre, Jean Marie	462	1	0	0	0
<b>Bijou</b>	Platon	0.631	Bijou, Cancy, Gran Djo	1167	1	300	4	5

P : population concernée, Ca : nb. Interventions sur les captages, A : longueur adduction (m), Ci : nb. Interventions sur les citernes de 6 m<sup>3</sup>, F : nb d'interventions sur les fontaines

Tableau 23. Exemple de *reporting* sur les sources et sur les interventions envisagées par habitation (source : Imbernon, Cirad).

### La cartographie participative à partir d'une image satellitale à très haute résolution

L'expérience de cartographie participative à très haute résolution en Haïti a conjugué une offre technologique en imagerie satellitale et une méthode déjà largement utilisée pour favoriser l'implication de la population dans le diagnostic sur le territoire et ses ressources, l'approche participative. Une approche participative avait déjà été utilisée dans ce projet pour réaliser une carte « mentale » de la commune avec ses habitants. Cette approche de la représentation des savoirs locaux était alors en vogue, mais elle avait de nombreux inconvénients. Elle ne prenait pas en considération la métrique (aires, réseaux), ne permettait pas la localisation dans l'espace et ne traduisait pas (ou mal) la variabilité des ressources naturelles et des usages. L'espace est traité de manière simplifiée, caricaturale même comme le montre l'exemple de carte mentale réalisée lors d'un précédent diagnostic participatif de la commune (Fig. 120). Ces cartes mentales ne peuvent pas en aucune manière servir de support à la planification et à l'aménagement du territoire.



leur expliquer les attendus de la cartographie et préciser avec eux la méthode de cartographie participative (Fig. 121). Il est apparu rapidement que les animateurs du projet lisaient l'image sans difficulté et qu'ils identifiaient facilement les différents éléments du territoire.

Un des aspects méthodologiques précisé avec eux au cours de l'atelier préparatoire a été la nomenclature de l'occupation des terres à adopter. Les animateurs (et *a fortiori* les agriculteurs) avaient des difficultés à caractériser l'occupation des terres avec la nomenclature internationale de l'USGS que je proposais. Cette nomenclature était difficile à traduire en langue créole, et elle s'adaptait peu semblait-il aux paysages montagneux d'Haïti. Or les habitants de cette région avaient, pour caractériser l'occupation de ces terres, leur propre dénomination à laquelle ils étaient habitués. De plus cette nomenclature vernaculaire, en langue créole, paraissait beaucoup plus riche du point de vue thématique que celle de l'USGS. C'est cette nomenclature vernaculaire que j'ai retenue pour la cartographie participative (Tableau 24).



Figure 121. Atelier de formation des animateurs du projet (source : Imbernon, Cirad).

Terres de cultures vivrières : pois, patate douce, igname, maïs	<b>Tè viv</b>
Savanes herbeuses	<b>Savann</b>
Savanes arbustives, généralement sur fortes pentes avec affleurements rocheux	<b>Makay</b>
Forets, bosquets, parfois avec igname	<b>Rak</b>
Plantations caféières, avec ou sans bananier. La densité de caféiers est très variable et les caféiers peuvent avoir disparu	<b>Jaden bati</b>

Tableau 24. Nomenclature vernaculaire de l'occupation des terres utilisée pour la cartographie participative sur la commune de Marmelade en Haïti (source : Imbernon, Cirad).

Au-delà de la cartographie de l'occupation des terres, la méthode pour caractériser les contraintes naturelles et les processus de dégradation des terres sur la commune a été abordée avec les animateurs. La pente du terrain, l'érosion et le déboisement sont apparus difficiles à représenter sur l'image ; seule la fertilité des sols pouvait être représentée, en utilisant dans ce cas aussi une nomenclature vernaculaire (Tableau 25).

Sols nus, avec affleurements rocheux, incultes	Tè fini
Terres fertiles, dont le rendement varie de 5 à 15 marmites de haricots récoltés pour 1 marmite de semence	Tè gra
Terres peu fertiles, dont le rendement est inférieur à 5 marmites de haricots récoltés pour une marmite de semences	Tè pòv

Tableau 25. Nomenclature vernaculaire pour les contraintes de fertilité des sols (source : Imbernon, Cirad).

La cartographie participative s'est ensuite déroulée dans chacune des trois sections communales, sur une journée dans chaque section, avec les populations locales. Ces ateliers étaient organisés en différentes phases, à savoir :

- une présentation en créole par un animateur du projet FAO pour expliquer l'objectif de l'atelier et ses attendus, présenter l'image satellitale imprimée, expliquer le choix de la nomenclature vernaculaire, et constituer deux groupes ; chaque groupe était composé d'environ 10 personnes et avait à sa disposition une image imprimée ;
- l'apprentissage à la lecture de l'image (une heure minimum) pour se positionner sur l'image, identifier les principales structures du paysage (piste, village...) et les objets familiers à chacun des participants (habitation, champ, arbre...) ; chaque image était disposée à plat pour conserver les repères horizontaux et était orientée géographiquement (le nord de la carte en direction du nord géographique) de telle sorte que les participants puissent aisément visualiser à l'extérieur de la salle les éléments du paysage qu'ils identifiaient sur l'image ;
- la photo-interprétation de l'image avec un groupe qui cartographiait l'occupation des terres, l'autre la fertilité des sols. Le tracé des « polygones » délimitant les unités de la nomenclature était réalisé sur un calque plastifié avec les feutres de couleur effaçables. A ce stade, les discussions ont été animées entre les participants et les animateurs ont joué un rôle précieux pour encadrer et parfois modérer les discussions. Après deux heures environ, les groupes étaient intervertis, et il leur était alors demandé de critiquer la carte réalisée par l'autre groupe. Des modifications, le plus souvent mineures, étaient alors apportées, mais ces modifications nécessitaient l'accord du groupe précédent et pouvaient donner lieu encore à des discussions animées.

Lorsque les cartes d'occupation des terres et de contraintes de fertilité des sols étaient terminées sur l'ensemble de la section communale, une évaluation collective du travail était animée par le responsable de l'approche participative à la FAO pour faire apparaître les difficultés rencontrées dans cet exercice et faire avec eux une analyse du territoire et des ressources naturelles à partir de ces cartes.

Sur les 3 sections communales, soit sur une superficie totale d'environ 15 000 ha, la cartographie participative a été réalisée en seulement 3 jours. Le soir même de chaque atelier, la carte réalisée par les participants était digitalisée sur ordinateur et intégrée dans le système d'information géographique. Le simple fait de présenter, le lendemain de chaque atelier, la carte et les superficies de chaque unité obtenues à partir de l'atelier du jour précédent a eu un impact fort sur la motivation des participants. Ils pouvaient en effet voir le résultat immédiat de ces ateliers et la représentation du territoire tel qu'ils le percevaient (Fig. 122).

Cette expérience a en tout cas montré que le contenu thématique des cartes réalisées avec la participation des villageois pouvait être riche et précis. Bien plus certainement que ce qu'aurait pu produire un expert cartographe en plusieurs semaines de terrain, car la connaissance du territoire qu'ont ces populations est bien plus importante que celle que peut acquérir un expert « de passage » sur le terrain.

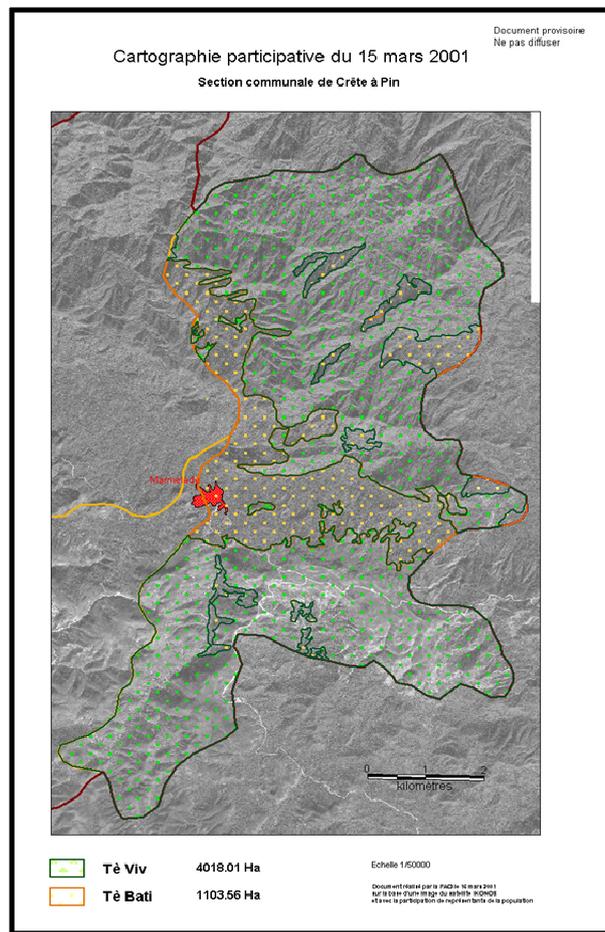


Figure 122. Carte d'occupation des terres obtenue avec la participation des villageois sur une section de la commune de Marmelade en Haïti (source : Imbernon, Cirad).

Enfin, cette expérience a démontré, si besoin en était, la grande facilité avec laquelle les villageois peuvent lire une image détaillée de leur territoire, photographie aérienne ou image satellitale, et s'approprier cette information pour la mettre en perspective avec leurs connaissances du terrain. De plus, le fait d'utiliser une image géoréférencée permet d'avoir des estimations quantitatives comme ici la superficie des cultures de caféier ou la longueur totale de diguettes antiérosives sur les versants. La dimension quantitative de cette cartographie participative contribue de plus à donner un grand intérêt à cette approche.

### **4.3 Un exemple de systèmes d'information dans une région transfrontalière d'Amérique centrale**

J'ai été amené plus récemment dans le cadre d'un projet régional soutenu par la Commission européenne (FP6) à développer des systèmes d'information pour des communes et des communautés de communes dans une région transfrontalière d'Amérique centrale, dans le souci de mieux gérer les ressources naturelles de cette région, et en particulier les ressources en eau. Cet isthme centraméricain est une des régions les plus fragmentées politiquement du monde et sur 523 160 km<sup>2</sup> de l'isthme coexistent sept Etats qui partagent 3 455 kilomètres de frontières. Les fleuves et les rivières constituent souvent les limites entre ces Etats et plus de 20 bassins hydrographiques sont partagés par au moins deux Etats (Fig.123). La délimitation politique de ces frontières a provoqué de nombreuses tensions politiques et militaires et, parmi ces tensions politiques régionales, plusieurs ont pour origine le contrôle des ressources naturelles, et de l'eau en particulier. En 1969, par exemple, eut lieu un conflit armé entre El Salvador et le Honduras que l'on a coutume d'appeler la « guerre du football » (après un match éliminatoire de la coupe du monde entre les deux pays). Mais cette guerre n'était que l'aboutissement de tensions sur des limites frontalières mal définies entre les deux pays et il est intéressant de noter que lors de ce conflit les troupes d'El Salvador n'envahirent le territoire hondurien que dans la partie haute du bassin versant du rio Lempa, une zone stratégique pour l'accès à la ressource en eau dans la région. Aussi ces frontières sont souvent regardées comme des « cicatrices de l'histoire ».

Les régions transfrontalières peuvent aussi être vues comme des « passerelles » entre les pays et faciliter l'intégration régionale. Ainsi le bassin du rio Lempa, partagé par les Républiques du Guatemala, du Honduras et d'El Salvador, représente un exemple intéressant de gestion transfrontalière de l'eau. De nouvelles pratiques de démocratie participative transcendant les territoires sont mises en œuvre et des communautés de communes se créent avec des compétences étendues à la gestion des ressources naturelles et au développement territorial. Dans ces nouvelles formes de gouvernance locale, le rôle de l'information est déterminant : c'est autant un support de réflexion et d'analyse qu'un moyen « médiateur » entre les acteurs locaux, les collectivités territoriales et les institutions nationales.

La région transfrontalière de cette étude se trouve à la frontière de trois pays : le Guatemala, Le Honduras et le Salvador, autour du point Trifinio (Fig. 124) et une partie de cette région couvre la partie haute du bassin hydrographique du rio Lempa qui se jette dans l'océan Pacifique (Fig. 125). Les problèmes liés à la gestion de l'eau sont nombreux dans cette région, mais ils sont en grande partie liés aux conditions de pauvreté dans lesquelles vivent les populations.

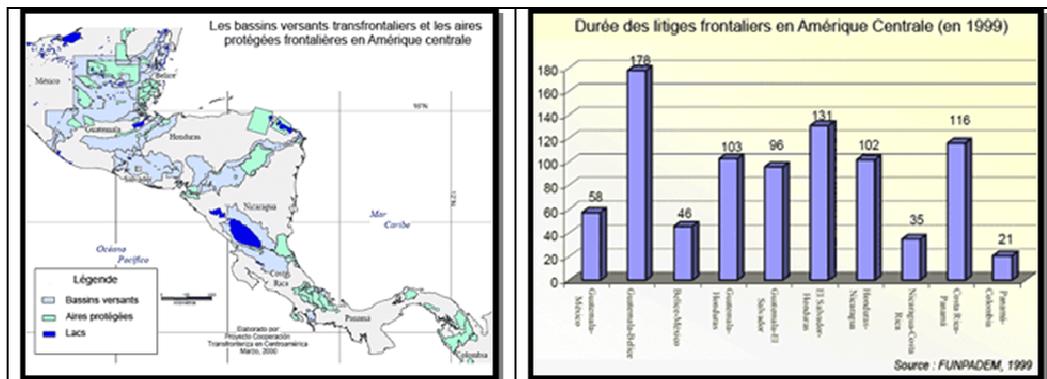


Figure 123. Litiges frontaliers et bassins versants d'Amérique centrale (source : FUNPADEM).



Figure 124. Localisation du point Trifinio (source : Imbernon, Cirad).



Figure 125. La région Trifinio (limite bleue) et le bassin versant du rio Lempa (source : Imbernon, Cirad).

Aussi pour promouvoir le développement de la région et la protection de ses ressources naturelles, les trois gouvernements concernés ont signé en 1998 un traité. Ce traité trinational définit la région comme une entité écologique indivisible pour laquelle « *seule l'action conjointe des trois pays pourra donner une solution satisfaisante aux problèmes qui affectent ses populations et à la gestion de ses ressources naturelles* ». En conséquence de ce traité, un plan pour le développement de la région, le plan Trifinio, a été élaboré et la commission trinationale du plan Trifinio a été chargée de le mettre en œuvre.

Mais au même moment, chacun des trois pays a transféré les compétences de gestion de l'environnement, et en particulier de gestion de l'eau, aux communes. De fait, les communes s'organisent en communautés de communes (*mancomunidades*) et il existe en 2004 cinq *mancomunidades* dans la région de Trifinio. Enfin, en 2008, 12 communes de cette région transfrontalière se sont associées en *mancomunidad trinationale*. Il semble que ce soit la première communauté de communes transfrontalière dans le monde : une expérience unique.

C'est donc dans ce cadre géographique, social et politique, avec les questions liées à la gestion de l'eau en toile de fond, que j'ai coordonné le projet Sinrem<sup>68</sup> qui traite de la question de la circulation de l'information entre les acteurs à différents niveaux de prise de décisions, depuis le niveau local (les municipalités) jusqu'au niveau national (les ministères). En effet, pour traiter des questions de gestion territoriale et de gestion des ressources naturelles, le niveau d'information entre les institutions nationales et les communes était largement déséquilibré au bénéfice des premières.

Un des enjeux du projet Sinrem était donc de produire des informations pertinentes à l'échelle locale, de partager l'ensemble des informations entre les institutions nationales et locales et de contribuer à mettre en cohérence les projets locaux avec les politiques nationales. Le projet s'est surtout focalisé sur la ressource en eau de la région que la commission Trifinio considérait comme un « bien public régional ».

### **Perception des ressources naturelles de la zone du Trifinio par les acteurs locaux**

Plus de 40 ateliers formels ont été organisés dans les communautés rurales concernées. Il s'agissait de préciser la perception qu'avaient les populations locales de leurs ressources naturelles, et d'identifier les conflits d'usage entre les différents acteurs. Dans la seule commune de San Ignacio en El Salvador, 15 ateliers ont été organisés avec les acteurs institutionnels locaux et les représentants de la société civile (Tableau 26).

Les participants à ces ateliers étaient issus du conseil municipal, d'organisations locales internes (associations d'irrigants, comité de l'eau, association des agriculteurs...), d'organisations externes (projets et institutions étatiques ou régionales), et de représentants du secteur du tourisme (Photos 15 et 16).

Ces ateliers ont permis de mettre en évidence les problèmes majeurs liés aux ressources naturelles, tels que perçus par les populations (Tableau 27). Ils sont relativement hétérogènes au niveau de chaque commune, mais beaucoup de problèmes sont communs aux différentes communes (contamination des eaux de surface, déforestation et érosion des sols).

---

<sup>68</sup> Synchronizing Information for Local-National Participatory Natural Resources Management. Projet FP6 de la Commission européenne que j'ai coordonné.

Number of workshops	Type of workshops	Objective	Participants and topics	Date
7	National workshops	To identify problems and to socialize the actions of the project.	Institutional representatives, local leaders, local governments, university professors and students, project partners. .	Feb. 19-21, 2007
		To socialize the Information System on water resources developed by the project	Local actors and technicians of Local Governments	Dec. 2008 July 2007 Oct. 2008
		To validate the proposal for a river basin management and for a Water management Committee. To share the final results of Project with the local actors	Representatives of: communities and national institutions, irrigation associations, schools professors, water committees, Mancomunidad Cayaguanca, Municipality of San Ignacio, projects officers, NGOs.	Jan. 29, 2009 Jan. 30, 2009 Feb. 24, 2009
8	Community workshops	To get data and to identify problems and necessities of the population of the river basin (characterization).	Members of the different organizations within the communities El Carmen, El Rosary, Santa Rosa and Río Chiquito.	Nov. 01, 2007 June 30, 2007 June 23, 2007. Nov.24, 2007. May 10, 17, 24, 31, 2008

Tableau 26. Ateliers de concertation avec les acteurs locaux sur la commune de San Ignacio en El Salvador (source : projet Sinrem).



Photo 15. Atelier national de socialisation du projet (source : Imbernon, Cirad).



Photo 16: Atelier communal d'identification des besoins et conflits (source : Imbernon, Cirad).

Problems	Factors	Effects	Actors involved
Soil and water contamination in the medium and lower part of the watershed by human and animal fecal material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No garbage recollection</li> <li>- No official garbage deposit but clandestine ones.</li> <li>- Lack of conscience and environmental education within local population</li> <li>- No program of organic recycling</li> <li>- Inadequate and excessive use of agro-chemicals</li> <li>- Important soil erosion that drags lot of sediments towards the river</li> <li>- lack of any network and treatment of used waters</li> <li>- Lack of protection of the water sources</li> <li>- No latrines in the communities of Rio Chiquito, Santa Rosa and El Carmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proliferation of gastro-intestinal diseases (EDAS)</li> <li>- Effects on the farming production</li> <li>- Effects on the biological diversity</li> <li>- Reduction of water availability for human consumption</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhabitants of the river basin</li> <li>- municipal Governments</li> <li>- Tourists</li> <li>- Associations of Communitarian Development</li> <li>- schools</li> <li>- Mac/Centa</li> <li>- Health Centres.</li> </ul>

Deforestation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Use of firewood as energy</li> <li>- Extension of agricultural areas</li> <li>- Extension of tourist centres, urban areas and roads networks</li> <li>- No application of the 'forest law'</li> <li>- forest fires</li> <li>- Lack of conscience and environmental education within the local population</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduction of biodiversity</li> <li>- Soil erosion and increase of surface run-off and sediments</li> <li>- Increase of landslides</li> <li>- Reduction of water infiltration</li> <li>- Climate change</li> <li>- Degradation of areas with touristic potential</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhabitants of the river basin</li> <li>- municipal Governments</li> <li>- Associations of Communitarian Development</li> <li>- Mag/Centa</li> </ul>
Soil erosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deforestation</li> <li>- Lack of conscience and environmental education within local population</li> <li>- forest Fires</li> <li>- No program of soil conservation</li> <li>- Reduction of the natural vegetation cover through agricultural land use</li> <li>- Inadequate practices</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentation in the rivers and water tanks</li> <li>- Lost of areas with agricultural potentialities</li> <li>- Decrease of soil fertility</li> <li>- Increase of the landslides in the medium and upper part of the river basin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhabitants</li> <li>- Adesco</li> <li>- Centa</li> <li>- Mag</li> <li>- Association of irrigation</li> </ul>
Forest fires: frequently in the localities of El Carmen, El Rosario and Santa Rosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementation of inappropriate agricultural practices</li> <li>- Lack of conscience and environmental education within local population</li> <li>- Lack of equipment and human resources for prevention and control of fire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soil erosion and decreasing soil fertility</li> <li>- Extinction of some vegetal and animal species</li> <li>- Reduction of the natural forests area</li> <li>- Increase of the landslide risk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhabitants of the river basin</li> <li>- municipal Governments</li> <li>- Associations of Communitarian Development</li> <li>- Association of irrigation</li> <li>- schools</li> </ul>
Landslides	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deforestation and land use changes of use on non-suitable lands for agriculture</li> <li>- Reduction of the natural vegetation cover on high slopes</li> <li>- Lack of soil conservation works.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deposit of a great amount of sediments in the water tanks</li> <li>- total or partial obstruction of the natural river flow that can produce floods</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inhabitants of the river basin</li> <li>- municipal Governments</li> <li>- Associations of Communitarian Development</li> <li>- Mag/Centa</li> </ul>

Tableau 27. Les problèmes liés aux ressources naturelles tels que perçus par la population de la commune de San Ignacio en El Salvador (source : projet Sinrem).

Ces ateliers ont en particulier permis de mettre en évidence les conflits liés à l'eau entre les trois principales parties en présence localement : les consommateurs d'eau potable, les services de gestion communaux et les associations d'irrigants (Photo 17).



Photo 17. L'agriculture irriguée sur la commune de San Ignacio prélève énormément d'eau et engendre des pollutions par les pesticides (source : Imbernon, Cirad).

### Structure du système d'information et transfert dans les communes

Ces ateliers ont permis aussi de mieux cerner les besoins en information pour les systèmes d'information qu'il était envisagé de développer pour les communes et les communautés de communes pour élaborer des plans de développement ou de gestion et pour dialoguer à la fois avec les institutions nationales et avec les organisations locales. La mise en œuvre et la gestion de ces systèmes d'informations a mobilisé trois types d'acteurs :

- les 20 communes partenaires de la région, qui représentaient les utilisateurs finaux de ces systèmes ;
- les universités nationales du Guatemala, du Honduras et d'El Salvador qui assuraient le développement des systèmes dans chaque pays, et la cohérence technique et méthodologique entre les trois pays ;
- la commission du Plan Trifinio et la *mancomunidad trinacional* qui étaient les opérateurs régionaux en charge de la maintenance des systèmes.

Les systèmes d'information étaient structurés en sous-modules : facteurs biophysiques, socio-démographie, acteurs et projets, organisations administratives, cartes et images (voir Fig. 126). Chaque donnée était renseignée par des métadonnées au standard FGDC utilisé en Amérique centrale. Ces métadonnées ont été regroupées en sept sections principales : identification, qualité, organisation et type, référence spatiale, entités et attributs, distribution et référence des données. Dans chaque section, des champs étaient obligatoires et d'autres optionnels. Un exemple de saisie de métadonnées au standard FGDC est donné ci-dessous (Fig.127).

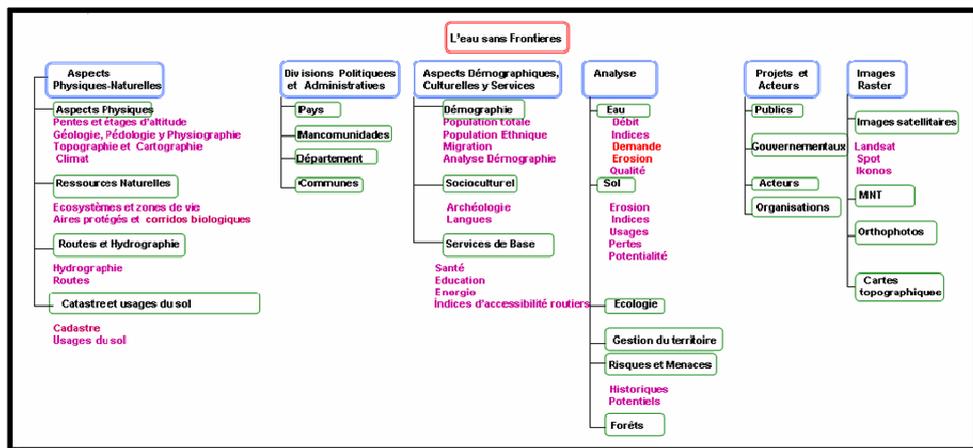


Figure 126. Structure du système d'information (source : Cirad).

Le screenshot montre une fenêtre d'édition de métadonnées intitulée 'Editing 'contaminacion-tempa-el-salvador''. Le titre de la fenêtre est 'Editing 'contaminacion-tempa-el-salvador'' et elle contient plusieurs onglets : 'Identification', 'Data Quality', 'Data Organization', 'Spatial Reference', 'Entity Attribute', 'Distribution', et 'Metadata Reference'. L'onglet 'Identification' est sélectionné et sous-catégorisé en 'General', 'Contact', 'Citation', 'Time Period', 'Status', 'Spatial Domain', 'Keywords', 'Browse Graphic', 'Security', et 'Cross Reference'. Le champ 'Description' est divisé en 'Abstract', 'Purpose', 'Language' (contenant 'fr'), et 'Supplemental Information'. Les champs 'Access Constraints' et 'Use Constraints' contiennent des messages 'REQUIRED: Restrictions and legal prerequisites for accessing the data set.' et 'REQUIRED: Restrictions and legal prerequisites for using the data set after access is granted.' respectivement. Le champ 'Data Set Credit' est vide. Le champ 'Native Data Set Environment' contient 'Microsoft Windows XP Version 5.1 (Build 2600) Service Pack 2; ESRI ArcCatalog 9.2.0.1324'. Le champ 'Native Data Set Format' contient 'Shapefile'. Des boutons 'Save', 'Cancel' et 'Help' sont situés en bas à droite.

Figure 127. Exemple de formulaire de métadonnées FGDC (source : projet Sinrem).

Une fois réalisés, ces systèmes d'information ont permis de réaliser de nombreuses études sur la région du Trifinio et de restituer des informations précises sur les ressources sur le territoire et les dynamiques en cours. Les exemples ci-dessous montrent la représentation cartographique des zones de recharge des aquifères sur le bassin versant de Jupula dans la commune de San Ignacio (Fig. 128) et le tableau des débits des sources et cours d'eau mesurés sur ce bassin versant (Fig. 129).

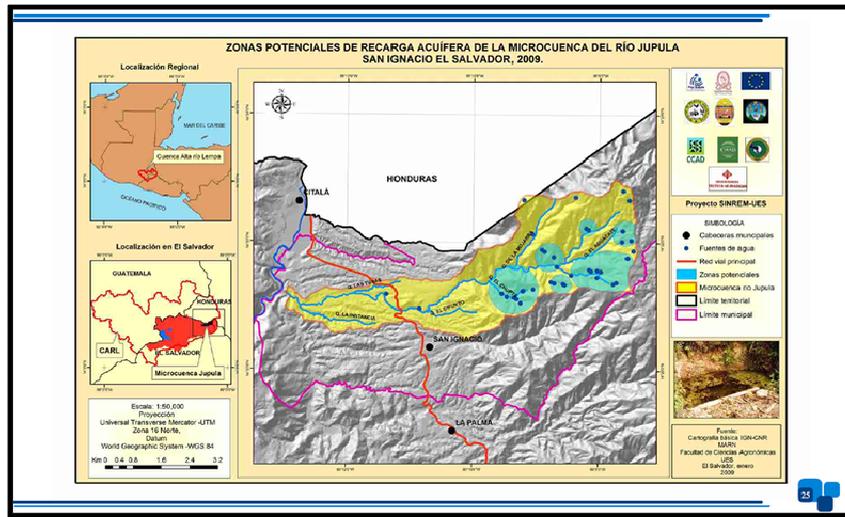


Figure 128. Carte des zones de recharge des aquifères et localisation des sources sur le bassin versant de Júpula en El Salvador (source : Université d'El salvador).



Figure 129. Débits des sources et des cours d'eau sur le bassin versant de Júpula en El Salvador (source : Université d'El salvador).

## Formation des utilisateurs locaux et diffusion de l'information

La formation des utilisateurs, que ce soit les agents techniques des municipalités ou ceux de la commission trinationale du plan Trifinio, a été une priorité constante dans le projet. Tout d'abord un administrateur de bases de données à la commission Trifinio a été formé à la mise à jour des données, au contrôle-qualité des données, et à l'administration du serveur et des accès au serveur. Mais c'est surtout sur la formation des techniciens des municipalités de la région que l'effort a porté : formation théorique aux SIG et formation pratique aux outils de SIG à l'Université de El Salvador pendant une semaine, puis formation sur site (dans chaque municipalité) à l'utilisation du système. La coopération allemande (GTZ) qui avait financé l'achat des équipements et des logiciels informatiques pour chaque commune et communauté de commune de la région a contribué au transfert du système dans les municipalités et à la formation. Ainsi chaque municipalité a disposé des outils informatiques de SIG, de la formation à l'utilisation de ces outils et des bases de données constituées par le projet.

La diffusion des informations auprès d'un public plus élargi s'est ensuite faite de deux manières avec l'édition de documents papier. Ainsi trois atlas ont été édités (Fig. 130) ; chacun présente les informations et les analyses réalisées sur les bassins versants de communes de la région. De plus, un site Web a été développé. Il s'agit du site « *Aguas sin fronteras* » (Fig. 131) qui intègre la base de données et offre des fonctions de cartographie en ligne. Ce site est hébergé par 'Comision Centroamericana de Ambiente y Desarrollo' (CCAD), une organisation régionale pour l'Amérique centrale.





Figure 131. Page d'accueil du site Web « Aguas sin fronteras » intégrant le Système d'Information (source : projet Sinrem).

Par la formation des utilisateurs au niveau local dans les communes et communautés de communes de cette région transfrontalière, et par la large diffusion des données collectées et analysées, ce projet a eu un fort impact dans la région du Trifinio. Les collectivités se sont approprié le système d'information installé chez chacune d'elles, bien sûr certaines mieux que d'autres (l'analyse de cette acceptation sociale des systèmes d'information serait intéressante à faire avec un peu de recul). Cette réalisation a montré qu'il était possible de faciliter la circulation de l'information entre les acteurs de différentes communes, y compris de part et d'autre de frontières nationales, et de favoriser une prise de conscience pour la gestion des ressources naturelles.

### En guise de propos d'étape dans mon parcours scientifique

Je viens de donner ci-dessus quelques éléments qui permettent de jalonner le cheminement de mon parcours scientifique. Dans un tel exercice, il m'est difficile de rapporter tous les travaux réalisés. Je n'ai pas cité par exemple les cartes de la culture du café au Chiapas-Mexique réalisées en 2007 pour les coopératives de producteurs de cette région, ou l'« Atlas de Agricultura y Bosque en El Salvador » édité en 2002 pour le ministère de l'Environnement. Ces travaux ont été menés selon une démarche scientifique, en mobilisant des données et des méthodes autour d'un questionnement. Les résultats de ces travaux n'ont pas été publiés dans des revues scientifiques, mais ils ont été d'une grande utilité pour les acteurs et les actions de développement de ces régions. D'une certaine manière, j'en tire une satisfaction plus grande encore que celle d'un papier publié dans une revue internationale.

Car je dois avouer que ce système d'une recherche de plus en plus productiviste dont le rendement est mesuré au nombre d'articles me désole parfois. Il ne passe pas une semaine sans que je reçoive un courrier

électronique d'une revue inconnue m'invitant à soumettre un article. Ce marché des publications s'est étendu comme s'il s'agissait d'un produit commercial. Ainsi, il y aurait maintenant environ 25 400 revues scientifiques et leur nombre croîtrait avec un taux annuel de 3,5 %. Au cours de l'année 2009, 1,5 million d'articles auraient été publiés. Cela entraîne des pratiques commerciales de plus en plus agressives de la part des revues pour attirer les « publiants ».

Il est vrai que ce marché des revues scientifiques correspond à une demande, car une pression de plus en plus forte est exercée sur les scientifiques pour qu'ils « produisent ». Le plagiat ou la duplication d'articles se répandrait, car il faut faire du nombre. Mais pire que le plagiat à mon sens, c'est le contenu de nombreux articles : il se publie n'importe quoi. Ou du moins il se publie de plus en plus d'articles dont la vocation n'est pas de contribuer à faire avancer nos connaissances, mais dont le seul but est d'« être » pour gonfler les statistiques de production. La recherche scientifique est devenue un monde soumis aux mêmes pressions productivistes que l'entreprise. Il faut réussir. Et seul compte le nombre d'articles publiés, car en dépendent nos carrières individuelles et même la survie de nos laboratoires. Une telle approche productiviste de la recherche ne peut se faire globalement qu'au détriment de l'éthique. Et cette composante éthique de la recherche est d'autant plus importante me semble-t-il que les travaux de recherche portent sur des pays du Sud où les indices de développement humain sont très faibles. Il ne s'agit pas d'être moralisateur, mais plutôt de soulever la réflexion sur cette évolution de la recherche que j'ai pu voir durant ma carrière. Je me rappelle encore de chercheurs de l'IRAT qui travaillaient sur la traction attelée au Sénégal. Trente ans après, ces matériels qu'ils avaient mis au point sont utilisés partout et sont partie intégrante des agricultures d'Afrique de l'Ouest. Quels résultats de la recherche avons-nous laissés depuis ? Quels impacts ont nos recherches sur ces agricultures des pays du Sud, alors que les publications scientifiques ont été décuplées ? Se poser cette question n'est pas un exercice vain pour nos recherches.

Dans ce parcours scientifique, il est difficile aussi de rendre compte de mon activité de coordonnateur de projets internationaux, faisant le lien entre des équipes de recherche de cultures diverses, animant les fréquentes réunions de projet qui réunissent ces équipes, et rédigeant les nombreux rapports à délivrer aux bailleurs de fonds de ces projets. Tout cela n'est pas comptabilisé dans les évaluations scientifiques, mais m'a occupé la majeure partie (si ce n'est la totalité) du temps surtout durant ces 10 dernières années. Ceux qui ont eu ce genre de responsabilité connaissent la « lourdeur » de ce système qui est chronophage et décourageant. Les feuilles de temps de chacun des chercheurs, détaillées à la demi-journée, les feuilles d'amortissement du matériel, les feuilles de déplacement de chacun et leur justification (sur le projet Sinrem, environ 250 déplacements à justifier), toute une série de feuilles et rapports à présenter que des agents administratifs se font un malin plaisir à contrôler dans le moindre détail. Je rêve de petits projets scientifiques dont la gestion serait basée sur la confiance, ayant la souplesse et la flexibilité nécessaire à nos actions de recherche dans les pays du Sud. Malheureusement ce n'est pas dans l'air du temps. Le 7e PCRD est même accusé d'« avoir donné trop de priorité à de petits projets peu structurants pour l'espace européen de la recherche et pour ses équipes » (dixit Isabelle Albouy, directrice des affaires européennes de l'Inra). Dans le monde de la recherche agronomique internationale (CGIAR), des méga-programmes se mettent en place. Pour le 8e programme-cadre de la commission européenne, ce seront probablement de « grands projets collaboratifs structurés ». Et pour la France, c'est des 'Labex' et autres 'Equipex'. Nous sommes encore et toujours dans des logiques d'entreprises : il faudrait faire « masse » et créer des poids lourds pour exister dans ce monde concurrentiel de la recherche. Je reste très sceptique sur cette évolution et je préférerais que soient favorisées les 'PME' de la recherche : des équipes cohérentes et performantes, et que soient développés et soutenus les réseaux entre ces équipes qui leur permette de s'enrichir mutuellement.

Ces commentaires sur le rôle des publications et sur les grands projets de recherche pourront paraître provocateurs et peu experts. Ils reflètent ma vision au travers du prisme de mon expérience personnelle et leur pertinence est peut-être limitée. Je ne fais que profiter de cette occasion pour l'exprimer. Mais il est un domaine où je revendique fortement mon expérience sur de nombreux terrains et sur divers projets : c'est celui des outils et des méthodes liés à l'utilisation de données de télédétection spatiale et plus généralement à la géomatique. Cette longue et riche expérience me donne l'avantage de pouvoir prendre du recul sur les recherches dans ce domaine et de leur porter un regard critique. Cette expérience devrait pouvoir aider à diriger des recherches sur l'information spatiale, les territoires et l'environnement dans les pays du Sud.

## Liste des Figures

Figure 1. Réflexion du rayonnement solaire.....	7
Figure 2. Spectre électromagnétique .....	8
Figure 3. Spectre du rayonnement solaire au dessus de l'atmosphère et de la mer.....	8
Figure 4. Exemple de rayonnement réfléchi, absorbé et transmis par une cible .....	8
Figure 5. Exemple de spectre de réflectance de la végétation dans le domaine optique. A: bande bleue, B: bande verte; C: bande rouge; D: bande proche IR; E: bande moyen IR proche .....	9
Figure 6. Exemple de signatures spectrales de deux types de végétation, d'une eau claire et d'une eau turbide, et d'un sol nu.....	9
Figure 7. Réflectances d'un type de végétation selon différents niveaux de stress hydrique.....	10
Figure 8. Parcelles humides et sèches sur un périmètre rizicole à Ségou au Mali.....	10
Figure 9. Champs de mil autour d'un village au Niger vus par le satellite Ikonos.....	10
Figure 10. Champs de mil au Niger vus d'avion en visée latérale .....	10
Figure 11. Photo hémisphérique au dessus d'un champ de mil au Niger .....	11
Figure 12. Semis en ligne de soja au Brésil .....	11
Figure 13. Ombre propre (1) et ombre portée (2) en terrain accidenté avec un éclairage solaire direct .....	11
Figure 14. Reliefs et ombres dans la région montagneuse de Lacandona au Chiapas (Mexique) sur une image Spot5.....	11
Figure 15. Le trajet atmosphérique du rayonnement solaire et les effets de l'atmosphère. ....	12
Figure 16. Classification de l'information radiométrique des pixels en thèmes pour réaliser une carte. ....	13
Figure 17. Image monospectrale seuillée sur l'histogramme. ....	14
Figure 18. Histogrammes bidimensionnels sur les canaux 2, 3 et 4 de Landsat .....	14
Figure 19. Seuillage sur un histogramme tridimensionnel des canaux 2, 3 et 4 de Landsat. ....	14
Figure 20. La classification d'image orientée-objet.....	15
Figure 21. Exemple de pixels mixtes sur un parcellaire.....	16
Figure 22. Confusion spectrale liée au « mélange » de classes.....	16
Figure 23. Comparaison d'une image Spot à 20 m de résolution (en vert, culture de mil ; en rouge, brousse tigrée) et d'une image Noaa-Avhrr à 1 km de résolution.....	17
Figure 24. Différence de perception du terrain avec deux images juxtaposées : Spot4 XS à 20m de résolution et Ikonos à 1m de résolution .....	17
Figure 25. Détails d'images Ikonos pan-sharpened de Guinée .....	18
Figure 26. Carte des précipitations cumulées en 1984 au Sénégal estimées à partir de la température radiative de surface .....	20
Figure 27. Relation entre la température radiative de surface et l'évapotranspiration au Sénégal (source : Seguin <i>et al.</i> , 1989). ....	20
Figure 28. Image Spot4 XS de mars 1995 sur Yaoundé au Cameroun .....	21
Figure 29. Image ERS-SAR d'avril 1996 sur Yaoundé au Cameroun .....	21
Figure 30. Evolution de la résolution spatiale des capteurs satellitaires d'observation de la terre depuis l'origine .....	22
Figure 31. Couverture spatiale des différents capteurs satellitaires.....	23
Figure 32. Carte d'occupation des terres dans le Nord d'El Salvador en 2002 réalisée par traitement automatique	25
Figure 33. Carte d'occupation des terres dans le nord d'El Salvador en 2002 réalisée par photo-interprétation et avec des savoirs locaux .....	25
Figure 34. Evolution générale des SIG .....	29
Figure 35. Evolution de l'utilisation des SIG .....	29
Figure 36. Photographie aérienne 3D de la Soufrière, Guadeloupe. ....	30
Figure 37. Parcelles cadastrales dans les gorges de l'Ardèche.....	30
Figure 38. Site du projet HCR.....	31
Figure 39. Portail de données du projet Lupis.....	31
Figure 40. Répartition mondiale des grands types de forêts .....	38
Figure 41. Evolution des forêts depuis 8000 ans .....	39
Figure 42. Evolution de la surface des forêts tropicales depuis 1800 .....	40
Figure 43. Sources et puits de carbone .....	41
Figure 44. Pourcentage d'espèces susceptibles de disparaître dans les forêts .....	41
Figure 45. Accumulation d'éléments minéraux dans une jachère .....	43
Figure 46. Baisse des rendements des cultures sur brûlis sans apport d'engrais .....	44

Figure 47. Image AVHRR du Sud-Cameroun en janvier 1993 .....	46
Figure 48. Image Spot de 1995 sur le site de Yurimaguas): en rouge, les forêts, en clair les cultures le long du réseau hydrographique en bleu .....	47
Figure 49. Les deux systèmes traditionnels d'agriculture sur brûlis à Yurimaguas.....	47
Figure 50. Séquence de mises en cultures sur une parcelle d'abattis-brûlis au sud du Cameroun.....	48
Figure 51. Mosaïque d'images Spot de 1995 sur le site de M'Balmayo (Cameroun) : en rouge, les forêts, en bleu les villes et en rouge clair les zones de culture .....	48
Figure 52. Image Spot de 1995 sur le site de Lampung à Sumatra (Indonésie): en rouge les plantations agro-industrielles et les reliquats de forêts, en clair les zones de culture des migrants .....	49
Figure 53. Le cycle du système d'agriculture sur brûlis "jungle rubber" pratiqué à Sumatra.....	49
Figure 54. Image Spot de 1996 sur le site de Pedro Peixoto dans l'Acre (Brésil) : en foncé les forêts, en clair les villes et les zones de culture qui se répartissent le long du réseau routier .....	50
Figure 55. Image Spot de 1996 sur le site de Theobroma au Rondonia (Brésil) : en foncé les forêts, en clair les villes et les zones de culture qui se répartissent le long du réseau routier .....	50
Figure 56. Image Spot de 1995 et photos aériennes de 1985 et 1958 de la région de Embu au Kenya.....	52
Figure 57. Occupation des terres de la région de Embu au Kenya en 1995 à partir d'une image Spot.....	52
Figure 58. Occupation des terres dans les « hautes terres » de Embu (Kenya) entre 1958 et 1995 .....	54
Figure 59. Statistiques d'occupation des terres dans les « hautes terres » de Embu (Kenya) en 1958, 1985 et 1995 .....	54
Figure 60. Evolution de la longueur de haies d'arbres autour des parcelles entre 1958 et 1995 dans les « hautes terres » de Embu.....	55
Figure 61. Changements d'occupation des terres entre 1958 and 1995 dans les « basses terres » de Embu .....	56
Figure 62. Localisation des 8 zones au Salvador pour l'étude des dynamiques d'occupation des terres .....	57
Figure 63. Les frontières avec la forêt en Amérique centrale depuis 8000 ans .....	59
Figure 64. Evolution du couvert forestier au Salvador de 1961 à 1995 .....	60
Figure 65. Occupation des terres en 2002 dans la zone Monte Cristo – Metapan.....	62
Figure 66. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone Monte Cristo – Metapan .....	62
Figure 67. Evolution relative des principaux types d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone de Metapan-Monte Cristo .....	63
Figure 68. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Fonseca et de Jiquilisco .....	64
Figure 69. Changements d'occupation des terres entre 1986 et 2002 dans la zone du golfe de Fonseca et de Jiquilisco .....	65
Figure 70. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Bajo Lempa.....	66
Figure 71. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du Bajo Lempa .....	67
Figure 72. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa.....	68
Figure 73. Changements d'occupation des terres entre 1986 et 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa .....	69
Figure 74. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Volcan de Santa Ana et du lac de Coatepeque .....	71
Figure 75. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du Volcan de Santa Ana et du lac de Coatepeque.....	72
Figure 76. Conversion des principaux types d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone de Santa Ana et Coatepeque.....	72
Figure 77. Conversion des terres entre 2002 et 1949 en fonction de l'altitude dans la zone de Santa Ana et Coatepeque .....	73
Figure 78. Occupation des terres en 2002 dans la zone du volcan de San Salvador .....	74
Figure 79. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du volcan .....	74
Figure 80. Localisation des centres urbains d'El Salvador .....	75
Figure 81. Changements d'occupation des terres entre 1949 et 2002 dans la zone du « Grand San Salvador » .....	75
Figure 82. Croissance annuelle du tissu urbain continu des principales villes d'El Salvador entre 1949 et 2002 .....	77
Figure 83. Croissance annuelle de l'agglomération urbaine autour des principales villes d'El Salvador entre 1949 et 2002.....	77
Figure 84. Evolution de la population urbaine et rurale entre 1930 et 2020 en El Salvador.....	78
Figure 85. Nombre de personnes relevant du HCR en 2007 et évolution du nombre de réfugiés entre 1998 et 2007.....	82
Figure 86. Répartition des populations réfugiées en 1997 et évolution entre 1997 et 1999 en Guinée Forestière .....	86
Figure 87. Recensement des populations réfugiées par préfecture .....	86
Figure 88. Reliefs et principales localités de Guinée .....	87
Figure 89. La forêt (vert) en Guinée et dans les pays voisins .....	87
Figure 90. Les cadres d'analyse des interactions dans l'espace .....	88
Figure 91. Carte des changements d'occupation des sols entre 1998 et 2001 sur la pointe de Gueckédou – Guinée.....	89
Figure 92. Comparaison entre des photographies aériennes IGN de 1979 et une image Spot de 2001 à la frontière entre Guinée et Sierra Leone .....	90
Figure 93. Les éléments constitutifs d'un paysage : la matrice correspond à la classe 1 .....	97
Figure 94. Les principaux processus spatiaux de transformation du paysage et leurs effets sur les attributs du paysage.....	98

Figure 95. Occupation des terres à partir d'images Spot.....	101
Figure 96. Occupation des terres en 1996 sur le <i>município</i> de Theobroma à partir d'une image Spot.....	102
Figure 97. Pourcentage de forêt par cellule sur chaque site.....	104
Figure 98. Dimension fractale par cellule sur chaque site .....	105
Figure 99. Variabilité interne des indices spatiaux du site de Pedro Peixoto - (Brésil).....	106
Figure 100. Zonage de l'espace en motifs de paysages sur le site de Pedro Peixoto – Brésil .....	107
Figure 101. Séquence d'images satellitales de 1973 à 1996 sur le <i>município</i> de Theobroma au Brésil .....	110
Figure 102. Zonage du <i>município</i> de Theobroma en 1996.....	111
Figure 103. Evolution de l'indice de Matheron des patches de forêts du site de Théobroma – Brésil .....	112
Figure 104. Evolution de la taille moyenne des patches de forêt du site de Théobroma - Brésil.....	112
Figure 105. Evolution de la distance moyenne au plus proche voisin des patches de domaine agricole du site de Théobroma – Brésil ...	113
Figure 106. La proposition de corridor biologique méso-américain dans l'isthme centraméricain .....	114
Figure 107. Limites géographiques et reliefs d'El Salvador .....	115
Figure 108. Deux indices de densité de patches dans deux paysages ayant la même surface pour chacune des classes, mais une fragmentation différente .....	117
Figure 109. Fragmentation des forêts d'El Salvador en 2002.....	118
Figure 110. Calcul de la connectivité entre patches d'un paysage.....	119
Figure 111. Comparaison des surfaces forestières connectées en fonction de la distance de connexion	119
Figure 112. Connectivité a) des forêts et b) des forêts + agroforêts avec une distance de connexion de 2,5 km .....	120
Figure 113. Points de passage entre les forêts d'El Salvador dans la région de Chalatenango (NW) et celle de La Union (NE) .....	121
Figure 114. Superposition du corridor biologique méso-américain et de la connectivité à 2,5 km a) des forêts et b) des forêts et des agroforêts à base de café.....	122
Figure 115. Impact de la disparition du café de « bajo » sur la connectivité du couvert forestier à 0,5 km.....	124
Figure 116. Impact de la régénération des forêts-galeries pour connecter les unités de conservation d'El Imposible et de Barra de Santiago .....	124
Figure 117. Principales étapes de la mise en œuvre du système d'information géographique de la commune de Marmelade en Haïti .....	129
Figure 118. Extrait d'une photographie aérienne prise en juillet 2000 sur la commune de Marmelade.....	130
Figure 119. Modèle conceptuel de données de la filière du charbon de bois à Marmelade en Haïti .....	131
Figure 120. Carte mentale réalisée lors du diagnostic participatif.....	133
Figure 121. Atelier de formation des animateurs du projet.....	134
Figure 122. Carte d'occupation des terres obtenue avec la participation des villageois sur une section de la commune de Marmelade en Haïti.....	136
Figure 123. Litiges frontaliers et bassins versants d'Amérique centrale.....	138
Figure 124. Localisation du point Trifinio .....	138
Figure 125. La région Trifinio (limite bleue) et le bassin versant du rio Lempa .....	138
Figure 126. Structure du système d'information .....	144
Figure 127. Exemple de formulaire de métadonnées FGDC .....	144
Figure 128. Carte des zones de recharge des aquifères et localisation des sources sur le bassin versant de Jupula en El Salvador....	145
Figure 129. Débits des sources et des cours d'eau sur le bassin versant de Jupula en El Salvador .....	145
Figure 130. Atlas réalisés sur trois bassins versants du Salvador, Guatemala et Honduras à partir du système d'information.....	146
Figure 131. Page d'accueil du site Web « Aguas sin fronteras » intégrant le Système d'Information .....	147

## Liste des Photos

Photo 1. Mosaique de café, pâturages et forêts dans la région du Trifinio au Guatemala .....	19
Photo 2. Image Ikonos de la région du Trifinio au Guatemala .....	19
Photo 3. Mobilisation des techniciens agricoles des coopératives de producteurs de café au Chiapas pour la cartographie des zones de production de café.....	27
Photo 4. Entretiens entre producteurs de café et techniciens agricoles pour la cartographie des zones de production de café.....	27
Photo 5. Pâturages sur des terres déforestées au Rondonia - Brésil .....	35
Photo 6. Jeune plantation de palmiers à huile en à Sumatra en Indonésie.....	35
Photo 7. Le transport fluvial à Yurimaguas peut atteindre Belem au Brésil .....	47
Photo 8. Une parcelle de plantain et manioc en forêt .....	47
Photo 9. Ouverture d'une parcelle de culture dans la forêt à Mbalmayo – Cameroun.....	48
Photo 10. Agriculture sur défriche – brûlis à Sumatra .....	49
Photo 11. Abattage de la forêt primaire au Rondonia .....	50
Photo 12. Camps de réfugiés à Guéckédou – Guinée .....	90
Photo 13. Agriculture sur brûlis à Guéckédou – Guinée .....	90
Photos 14. Paysages d'El Salvador : côte pacifique (hg), chaîne montagneuse du nord (hd), chaîne volcanique du centre (bg) et vallée centrale (bd).....	115
Photo 15. Atelier national de socialisation du projet .....	141
Photo 16: Atelier communal d'identification des besoins et conflits .....	141
Photo 17. L'agriculture irriguée sur la commune de San Ignacio prélève énormément d'eau et engendre des pollutions par les pesticides .....	143

## Liste des Tableaux

Tableau 1: Evolution des surfaces en terres disponibles (ha) par personne entre 1970 et 1999, dans diverses régions du monde .....	34
Tableau 2. Surfaces de forêts tropicales en 2005 et taux de déforestation .....	39
Tableau 3. Effets du brûlis sur l’horizon de surface des sols .....	43
Tableau 4. Occupation des terres au Sud Cameroun sur une image AVHRR de 1993 .....	46
Tableau 5. Occupation des terres sur les pentes sud du mont Kenya .....	53
Tableau 6. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Monte Cristo – Metapan .....	61
Tableau 7. Occupation des terres en 2002 dans la zone de Fonseca et de Jiquilisco .....	64
Tableau 8. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Bajo Lempa .....	66
Tableau 9. Occupation des terres en 2002 dans la zone du Cerro de Guazapa .....	69
Tableau 10. Evolution démographique des principales villes du Salvador .....	77
Tableau 11. Croissance démographique annuelle et expansion annuelle des principales villes du Salvador .....	78
Tableau 12. Nombre de « réfugiés » en Guinée en fin 2001 en fonction du statut .....	84
Tableau 13. Données démographiques de la région en 2001 .....	85
Tableau 14. Mode d’accès à la terre en Guinée forestière .....	93
Tableau 15. Mode de prêt de la terre .....	93
Tableau 16. Recours à de la main-d’œuvre .....	94
Tableau 17: Les différents systèmes de production .....	95
Tableau 18. Indices spatiaux sélectionnés pour l’analyse de la fragmentation du couvert forestier en zone de déforestation .....	103
Tableau 19. Comparaison des indices spatiaux sur les sites d’étude de la déforestation .....	104
Tableau 20. Statistiques de la couverture forestière en El Salvador .....	116
Tableau 21. Fragmentation du couvert forestier par type de forêt en El Salvador en 2002 .....	118
Tableau 22. Intersection entre le corridor biologique méso-américain et la connectivité des forêts pour différentes distances de connexion .....	123
Tableau 23. Exemple de <i>reporting</i> sur les sources et sur les interventions envisagées par habitation .....	132
Tableau 24. Nomenclature vernaculaire de l’occupation des terres utilisée pour la cartographie participative sur la commune de Marmelade en Haïti .....	134
Tableau 25. Nomenclature vernaculaire pour les contraintes de fertilité des sols .....	135
Tableau 26. Ateliers de concertation avec les acteurs locaux sur la commune de San Ignacio en El Salvador .....	140
Tableau 27. Les problèmes liés aux ressources naturelles tels que perçus par la population de la commune de San Ignacio en El Salvador .....	142

## Références

- Baudry J., 1986. *Approche écologique du paysage*. INRAP, Foucher. p. 23-32.
- Beier P., Noss R., 1998. *Do habitat corridors provide connectivity?* Conservation Biology, n°12(6). p. 1241-1252.
- Bennett, A. F., 1998. *Linkages in the landscape: the role of corridors and sensitivity in wildlife conservation*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 254 p.
- Berr J.K., 2007. *Map Analysis. Understanding Spatial Patterns and Relationships*. GeoTec Media, University of Denver, USA. 224 p.
- Bilsborrow, Richard E. 1992. *Population Growth, Internal Migration and Environmental Degradation in Rural Areas of Developing Countries*. European Journal of Population, vol. 8. p. 125-148.
- Bonnamour J., 1997. *La géographie rurale pendant le dernier quart de siècle*. Revue de l'Association des ruralistes français. URL : <http://ruralia.revues.org/5>.
- Boserup, E. 1965. *The conditions of agricultural growth: the economics of agrarian change under population pressure*. Allen and Unwin, London. 128 p.
- Boserup E., 1970. *Evolution agraire et pression démographique*. Ed. Flammarion, Paris. 224 p.
- Brundtland Commission, 1987. *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development*. Published as Annex to General Assembly document A/42/427. p. 11-14.
- Bryant D., 1997. *Last forest frontiers: ecosystems and economies on the edge*. Edited by World Resources Institute, Washington DC, USA. 44 p.
- Campbell J.B., 2002. *Introduction to remote sensing*. Third Edition. Taylor & Francis, London. 626 p.
- Clement V., 2004. *Le développement durable : un concept géographique ?* Géoconfluences. URL : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/DevDur/>
- Corrales L., Zuñiga T., 2001. *Análisis de Representatividad Ecológica del Corredor Biológico Mesoamericano*. CBM, Managua, Nicaragua. 10 p.
- Dedieu J.P., 1989. *Télédétection et montagne. Un outil privilégié pour l'étude des milieux d'altitude*. Revue de géographie Alpine, vol. 77, n° 77-1-3. p. 105-123.
- Deichmann U., Balk D., Yetman G. 2001. *Transforming population data for interdisciplinary usages: from census to grid*. Documentation for GPW Version 2. URL : [http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/GPW\\_documentation](http://sedac.ciesin.columbia.edu/plue/gpw/GPW_documentation).
- Dufumier M., 2004. *Agricultures et paysanneries des Tiers mondes*. Editions Karthala, France. 598 p.
- Dunning J.B., Danielson J.B., Pulliam, H.R., 1992. *Ecological processes that affect populations in complex landscapes*. Oikos, vol. 65, n°1. p. 169-175.
- FAO/UNEP. 1999. *The Future of Our Land - Facing the Challenge*. FAO/UNEP, Rome. 71 p.
- FAO, 2005. *Global Forest Resources Assessment*. FAO, Rome. 320 p.
- FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010*. FAO, Rome. 371 p.
- Forman R.T.T. , Godron M., 1986. *Landscape ecology*. Ed. John Wiley and Sons, New York. 619 p.

- Forman R.T.T., 1995. *Land Mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge. 632 p.
- Fox J., Rindfuss R.R., Walsh S.J., Mishra V., 2003. *People and the environment: Approaches by linking households and community surveys to remote sensing and GIS*. Kluwer Academic Publishers. 344 p.
- Gomez-Pompa A., Vazquez-Yanes C., Guevara S., 1972. *The Tropical Rain Forest: A Non-Renewable Resource*. Science, vol. 117, n° 4051. p 762-765.
- Goudrian J., 1992. *Où va le gaz carbonique? Le rôle de la végétation*. In La Recherche, n° 243. p. 597-604.
- Grinevald J., 1992. *Impact assessment of carbon dioxide and other green house gazes in climatic changes*. Conference organised by UNEP. *De Carnot à Gaia: histoire de l'effet de serre*. In La Recherche, n°243. p. 532-538.
- GTZ, 1999. *Land Use Planning. Methods, Strategies and Tools*. GTZ, Germany. 212 p.
- Hecht S.B, Kandel S., Gomes I., Cuellar N. and Rosa H., 2006. *Globalization, Forest Resurgence, and Environmental Politics in El Salvador*. World Development, vol. 34, n° 2. p. 308-323.
- Imbernon J., 2002. *Cartographie participative à très haute résolution. Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti*. Revue Internationale de Géomatique, vol. 12, n° 1. p. 115-128.
- Imbernon J., 2000. *Déforestation et pression démographique au Rondonia, Brésil*. Bois et Forêts des Tropiques, n°266. p. 23-33.
- Imbernon J., Branthomme A., 2001. *Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests*. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 9. p. 1753-1765.
- Kates R.W. and Haarman V., 1992. *Where the poor live: Are the assumptions correct?* Environment, vol. 34. p.4-28.
- Lambin E. F., Baulies X., Bockstael N., Fischer G., Krug T., Leemans R., Moran E. F., Rindfuss R. R., Sato Y., Skole D., Turner II B. L., Vogel C., 1999. *Land-Use and Land-Cover Change Implementation Strategy*. IGBP Report n°. 48 and IHDP Report n°. 10. Edited by C. Nunes and J. I. Augé. 126 p.
- Laurent P.J., Peemans J.P., 2006. *Les Dimensions Socio-Économiques du Développement Local en Afrique au Sud du Sahara : Quelles Stratégies pour quels Acteurs ?*. Bulletin de l'APAD, n° 15, Louvain-la Neuve. URL : <http://apad.revues.org/document553.html>.
- Liverman et al., 1998. *People and pixels: linking remote sensing and social science*. Edited by The National Academy Press, USA. 247 p.
- Mahar, DJ. 1989. *Government policies and deforestation in Brazil's Amazon Region*. World Bank, Washington D.C. 64 p.
- Meyer W. B., Turner II B.L., 1992. *Human population growth and land use/land cover change*. Annual Review of Ecology and Systematics, n° 23. p. 39-61.
- Meyer W.B., Turner B.L., 1994. *Changes in land use and land cover. A global perspective*. Cambridge University Press., United Kingdom. 506 p.
- Nye PH, Greenland DJ. 1961. *The soil under shifting cultivation*. Journal of plant nutrition and soil science, vol. 95. Technical Communication n° 51. p. 165.

- Ouaidrari H., Bégué A., Imbernon J., D'Herbès J.M. 1996. *Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels. Application to the HAPEX-Sahel degree square.* International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n°12. p. 2259-2280.
- Pain D., Benoit D., Levang P., Sevin O., 1989. *Transmigration et migration spontanées en Indonésie.* Propinsi Lampung, Jakarta/Paris, ORSTOM/Departmen Tansmigrasi. 444 p.
- Pete Fisher et al (2005). *Land use and Land cover: Contradiction or Complement.* In *Re-Presenting GIS.* Chichester, Wiley. p. 85–98.
- Peters WJ, Neuenschwander LF. 1988. *Slash and burn. Farming in the third world forest.* University of Idaho Press, Moscow, Idaho. 113 p.
- Purvis M., Grainger A, 2004. *Exploring sustainable development: geographical perspectives.* Ed. Earthscan, Londres. 388 p.
- Rindfuss, R. and Stern, P. 1998. *Linking remote sensing and social science: The need and the challenges.* In Liverman D., Moran E., Rindfuss R. and Stern P. (Eds.). *People and pixels.* National Academy Press, Washington, DC. p. 1-27.
- Ruthenberg H. 1971. *Farming systems in the tropics.* Clarendon Press, Oxford. 286 p.
- Sanchez PA. 1976. *Properties and management of soils in the tropics.* John Willey and Sons, New York. 618 p.
- Saunders, D.A. and R.J. Hobbs, editors. 1991. *Nature Conservation : The Role of Corridors.* Chipping Norton N.S.W., Australia. 442 p.
- Sayer J., 1991. *Conservation et protection des forêts tropicales humides: le point de vue de l'alliance mondiale pour la nature.* In *Unasylva*, vol. 42, n°166. p. 40-45.
- Seguin B., Assad E., Freteaud J.P., Imbernon J., Kerr Y., Lagouarde J.P., 1989. *Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions.* Int. J. Remote Sensing, vol. 10, n° 6. p 1101-1117.
- Skole, D.L., Tucker, C.J., 1993. *Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988.* Science, n°260. p. 1905–1910.
- Stern P.C., Young O.R., Druckman D., 1992. *Global environmental change: understanding the human dimensions.* National Academy of Science, USA. 292 p.
- Suret-Canale J., 1970. *La République de Guinée.* Éditions sociales, Paris . 431 p.
- Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G., 1993. *Connectivity is a vital element of landscape structure.* Oikos, n° 68. p. 571-573.
- Turner, B. L., Moss R. H., and Skole D. L., 1993. *Relating land use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project.* Joint publication of the International Geosphere-Biosphere Programme (Report No. 24) and the Human Dimensions of Global Environmental Change Programme (Report No. 5). Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm. 65 p.
- Venturini M. M., 2005. *Les TIC au service du développement territorial dans la construction et la transmission des savoirs.* Actes du colloque Cemaforad 2, Seconde édition, Université de Bejaia, Algérie. p. 1-7.
- Veyret Y., Arnould P., 2008. *Atlas des développements durables.* Éditions Autrement, Paris. 96 p.
- Wiens J.A., 1989. *Spatial scaling in ecology.* Functional Ecology, n°3. p. 385-397.