

Indicateurs d'environnement en zone tropicale

Application à la dégradation des forêts, des eaux et des sols
dans la province de Thai Nguyen au Viet Nam

Yannick Glemarec

Éditeur Scientifique
Pierre Brabant

Une recherche menée dans le cadre du projet STD3 - CT94-0310 de l'Union Européenne (DG XII)
et coordonnée par l'Institut de Recherche pour le Développement, France



Indicateurs d'environnement en zone tropicale

Application à la dégradation des forêts, des eaux et des sols
dans la province de Thai Nguyen au Nord du Viet Nam

Une recherche menée dans le cadre du projet STD3 - CT94-0310 de l' Union Européenne (DG XII) et
coordonnée par l'Institut de recherche pour le développement, France

Par

Yannick Glemarec

Éditeur Scientifique
Pierre Brabant

Unité de Service 140 ESPACE de l'IRD



22 DEC. 2003



Cette recherche méthodologique a été menée dans le cadre du projet DG12 - STD3 financé par l'Union Européenne (DG XII) et coordonnée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM), en partenariat avec l'Institut de Géographie du Centre National des Sciences Naturelles et de Technologie du Viet Nam. Le projet DG12 - STD3 avait pour principal objectif la réalisation d'une base de données géographique pour trois provinces situées dans les zones de collines et de montagnes du Viet Nam.

Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans le soutien de Pierre Brabant, Coordinateur du projet européen DG12 - STD3, pendant toute la durée de cette recherche. La justesse de ses remarques, l'importance de ses communications personnelles et la vigueur de ses critiques ont été cruciales pour l'achèvement de ce document. Cette publication a bénéficié de l'important appui technique de Pierre Peltre, responsable du Laboratoire de cartographie appliquée de l'IRD. Mes remerciements s'adressent particulièrement à deux personnes de ce laboratoire : à Stéphanie Bertrand qui a redessiné et harmonisé les 44 cartes de l'ouvrage et à Philippe Cazamajor d'Artois qui a effectué toute la mise en page éditoriale. Merci aussi à Yvette Veyret, Professeur à l'Université de Paris VII, pour sa relecture et sa correction des ébauches successives de ce document. Ses conseils et ses réflexions ont nourri les pages qui suivent.

Photo de couverture : G. Bourgeon

Contacts : Yannick Glemarec

Email : yannick.glemarec@undp.org

Pierre Brabant

Email : Pierre.Brabant@bondy.ird.fr

Institut de Recherche pour le Développement
Laboratoire de Cartographie Appliquée
Centre IRD d'Île de France
32, avenue H. Varagnat F 93143 Bondy Cedex

<http://www.bondy.ird.fr/carto>

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
I LES SYSTÈMES D'INFORMATION DE L'ENVIRONNEMENT	3
1.1 LES OBJECTIFS DES SYSTÈMES D'INFORMATION DE L'ENVIRONNEMENT	
1.1.1 Les objectifs et utilisateurs d'un système d'information de l'environnement	3
1.1.2 Les étapes et outils pour l'établissement d'un système d'information de l'environnement .	5
1.1.2.1 Collecte et structuration des données sur l'environnement	6
1.1.2.2 Analyse de l'information	10
1.1.2.3 La communication de l'information aux décideurs.....	15
1.2 LES INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DURABLE	
1.2.1 Les distorsions statistiques en matière de gestion de l'environnement associées aux indicateurs macro-économiques	18
1.2.2 Les principales initiatives pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement et de développement durable	19
1.2.3 Le rôle des indicateurs d'environnement dans la prise de décision	20
1.2.4 Classification des indicateurs	21
1.2.5 Elaboration et présentation des indicateurs d'environnement.....	22
1.2.5.1 Indicateur à un seul paramètre	22
1.2.5.2 Profils de qualité de l'environnement	22
1.2.5.3 Indices numériques (indicateurs composites).....	23
1.2.5.4 Indices graphiques	27
1.2.6 Modèles d'indices de fonctions de l'environnement	28
1.2.6.1 Le modèle à quatre indices du WRI.....	29
1.2.6.2 Le modèle du baromètre de durabilité proposé par l'IUCN	29
1.2.7 Les principales contraintes pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement	31
1.2.7.1 Analyse des modifications d'agrégation de l'IDH.....	31
1.2.7.2 La définition des seuils environnementaux.	33
1.2.7.3 Les principaux clivages de la pensée environnementale	35
II PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS	39
2.1 LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DU PROGRAMME STD3-CT94-0310	
2.1.1 Objectifs du programme.....	39
2.1.2 Le système d'information géographique	40
2.1.2.1 Structure du SIG.....	40
2.1.2.2 Mode d'acquisition des données	42
2.1.3 Les indicateurs d'environnement	43
2.2 L'ÉTAT DE L'ENVIRONNEMENT DANS LA PROVINCE PILOTE DE THAI NGUYEN	
2.2.1 État de l'environnement à Thai Nguyen.....	43
2.2.1.1 Le milieu	43
2.2.1.2 Pressions sur le milieu	44
2.2.1.3 Occupation des sols et variations du couvert forestier	46
2.2.1.4 Ressources minérales.....	49
2.2.1.5 Ressources et qualité des eaux	50

2.3 SELECTION DES INDICATEURS

2.3.1 Critères de sélection d'indicateurs d'environnement	54
2.3.1.1 Pertinence politique et utilité pour les utilisateurs	54
2.3.1.2 Justesse d'analyse	56
2.3.1.3 Mesurabilité et informations disponibles au travers du SIG.....	56
2.3.2 Sélection d'indicateurs de dégradation des terres	58
2.3.2.1 Indicateurs de dégradation des forêts.....	58
2.3.2.2 Indicateurs de dégradation des sols	59
2.3.2.3 Indicateurs de dégradation des eaux.....	60
2.3.2.4 Interface SIG/ Indicateurs de dégradation des terres	62

III AGRÉGATION DES INDICATEURS DE DÉGRADATION DES TERRES. 63

3.1 ÉLABORATION D'UN INDICE DE DÉGRADATION DES FORÊTS ET DE PERTE DE BIODIVERSITE

3.1.1 Agrégation d'un indice de risque de dégradation des forêts.....	63
3.1.1.1 Les principales causes de dégradation des forêts dans les hautes terres du Viet Nam.....	63
3.1.1.2 Agrégation d'un indice de pression sur les forêts pour les hautes terres du Viet Nam	64
3.1.2 Agrégation d'un indice d'état des forêts.....	67
3.1.2.1 Importance de la dimension et de la forme dans l'état de dégradation d'une forêt ..	67
3.1.2.2 Détermination de la dimension et de la forme des formations forestières	67
3.1.3 Agrégation d'un indice de réponse à la dégradation des forêts.....	69

3.2 ÉLABORATION DES INDICES DE DÉGRADATION DES SOLS.

3.2.1 Agrégation de l'indice de risque d'érosion des sols	71
3.2.1.1 Identification des facteurs influçant l'érosion hydrique	71
3.2.1.2 Indice de susceptibilité des sols à la dégradation (Banque Mondiale)	72
3.2.1.3 Détermination d'un indice de risque d'érosion des sols pour les hautes terres du Viet Nam	74
3.2.1.4 Agrégation de l'indice de risque d'érosion des sols	79
3.2.2 Agrégation d'un indice d'état d'érosion des sols pour les hautes terres du Viet Nam.....	79
3.2.2.1 Différentes méthodologies possibles pour estimer l'État de l'Érosion des sols.....	79
3.2.2.2 Agrégation de l'indice d'état de dégradation des sols à partir des signes visibles	80
3.2.3 Agrégation d'un indice de réponse à l'érosion des sols	81

3.3 ÉLABORATION D'INDICES DE PENURIE EN EAU

3.3.1 Développement d'un indice de risque de pénurie en eau	82
3.3.2 Elaboration d'un indice d'état de pénurie en eau	83
3.3.3 Elaboration d'un indice de réponse à la pénurie en eau	85

3.4 ELABORATION D'INDICES DE POLLUTION DE L'EAU

3.4.1 Elaboration d'un indice de risque de pollution de l'eau	87
3.4.1.1 Sélection des émissions contaminantes pour l'agrégation d'un l'indice de pollution de l'eau.....	87
3.4.1.2 Agrégation d'un indice de risque de contamination fécale	88
3.4.2 Agrégation d'un indice d'état de la pollution des eaux	89
3.4.3 Elaboration d'un indicateur de réponse à la pollution de l'eau	90

**IV PRESENTATION ET ANALYSES DES RESULTATS DES
INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT POUR LA PROVINCE DE THAI NGUYEN.....92**

4.1 INDICES DE DEGRADATION DU COUVERT FORESTIER

4.1.1. Indice de pression sur la forêt.	92
4.1.1.1 Présentation des résultats.....	92
4.1.1.2 Analyse des résultats.....	93
4.1.2 Indicateur d'état des forêts.....	95
4.1.2.1. Présentation des résultats.....	95
4.1.2.2 Analyse des résultats.....	96
4.1.3 Indicateur de réponse au déboisement	96
4.1.3.1 Présentation des résultats.....	96
4.1.3.2 Analyse des résultats.....	97

4.2 INDICES D'EROSION DES SOLS

4.2.1 Indice de risque d'érosion des sols	97
4.2.1.1. Présentation des résultats.....	97
4.2.1.2 Analyse des résultats.....	98
4.2.2 Indice d'état de l'érosion des sols	99
4.2.2.1 Présentation des résultats.....	99
4.2.2.2 Analyse des résultats.....	99
4.2.3 Indice de réponse à l'érosion des sols.....	100
4.2.3.1 Présentation des résultats.....	100
4.2.3.2 Analyse des résultats.....	101

4.3 INDICES DE DEGRADATION DE LA RESSOURCE EN EAU

4.3.1 Indice de risque sur la disponibilité en eau	102
4.3.1.1. Présentation des résultats.....	102
4.3.1.2 Analyse des résultats.....	106
4.3.2 Etat de disponibilité de la ressource en eau.....	106
4.3.2.1 Présentation des résultats.....	106
4.3.2.2 Analyse des résultats.....	108
4.3.3 Indice de réponse aux pénuries en eau	109
4.3.3.1 Présentation des résultats.....	109
4.3.3.2 Analyse des résultats.....	110

4.4 INDICATEURS DE POLLUTION DE L'EAU

4.4.1 Indicateur de risque de pollution de l'eau.....	112
4.4.1.1 Présentation des résultats.....	112
4.4.1.2 Analyse de résultats	113
4.4.2 Indicateur d'état de la pollution de l'eau	113
4.4.2.1 Présentation des résultats.....	113
4.4.2.2 Analyse des résultats	114
4.4.3 Indicateur de réponse à la pollution de l'eau	115
4.4.3.1 Présentation des résultats.....	115
4.4.3.2 Analyse des résultats.....	115

CONCLUSION	116
Annexe I: Cartes	119
Annexe II: Photos : paysages, sols, forêts, rivières de la province de Thai Nguyen.....	165
Annexe III: Les principales initiatives pour la mise en place d'une comptabilité de l'environnement	167
Annexe IV: Liste préliminaire des indicateurs du développement durable	172
Annexe V: Analyse des données de qualité de l'eau disponibles pour la rivière Cau	176
Annexe VI: Les principales causes de déforestation au Viet Nam.....	180
Annexe VII: Les principaux mécanismes de l'érosion hydrique	183
Annexe VIII: Les principales sources de pollution de l'eau dans les hautes terres du Viet Nam.	191
Annexe IX: Calcul des besoins en eau des périmètréss rizicoles de thai Nguyen	194
TRAVAUX CITÉS	197

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET ENCADRES

A. FIGURES

Figure 1 : Cycle de la prise de décision	4
Figure 2 : La pyramide de l'information	5
Figure 3 : Modèle Pression-Etat-Réponse (STRESS).	6
Figure 4 : Couvertures de base d'un SIG pour la gestion des ressources naturelles	12
Figure 5 : Le modèle d'acidification RAINS.....	14
Figure 6 : TARGETS - Modèle intégré de développement durable TARGET	16
Figure 7 : Représentation des indices et indicateurs selon le modèle de la pyramide de l'information	17
Figure 8 : Profil de qualité de l'environnement pour la région 10 de l'EPA en 1976	23
Figure 9 : Représentation graphique de l'indice de qualité de l'environnement de Inhaber ...	26
Figure 10 : Diamants de l'environnement.....	27
Figure 11 : Baromètre de durabilité.....	29
Figure 12 : Variations du classement IDH de la France et des Etats-Unis de 1990 à 1999	31
Figure 13 : Structure de la base de données géographique du projet	41
Figure 14 : Transect schématique du Nord Viet Nam	45
Figure 15 : Courbes de débit des deux principales rivières de Thai Nguyen.....	50
Figure 16 : Diagramme ombrothermique pour la station météorologique de Thai Nguyen	51
Figure 17 : Importance de la compacité dans la résistance des formations forestières à la dégradation	68
Figure 18 : Illustration de l'importance des périodes de pénurie en eau	84
Figure 19 : Capacité de stockage de l'eau en Asie	86
Figure 20 : Évolution opposée de la population et de la superficie forestière au Viet Nam	94
Figure 21 : Débit minimum d'étiage du Song Cau	108
Figure 22 : Débit minimum d'étiage du Song Cong.....	108
Figure 23 : Approvisionnement annuel en eau <i>per capita</i> en Asie.....	111
Figure 24 : Système intégré de comptabilité nationale économique et environnementale	168
Figure 25 : Principaux concepts de la comptabilité des ressources naturelles de la Norvège ..	169
Figure 26 : Structure du système de comptes du patrimoine naturel.....	171
Figure 27 : Evolution d Viet Nam de 1943 à 1992	180
Figure 28 : Evolution de la superficie des mangroves du Minh Hai de 1965 à 1989	182
Figure 29 : Triangle des textures	185
Figure 30 : Stabilité structurale d'un sol à l'érosion en fonction de sa structure.....	186
Figure 31 : Prévalence des différentes pratiques sanitaires dans 10 provinces du Viet Nam ...	191

B. TABLEAUX

Tableau 1 : Évaluation de la qualité de l'information détenue dans les bases de données de l'environnement	7
Tableau 2 : Caractéristiques principales des différents capteurs de Landsat, SPOT et NOAA/AVHRR	8
Tableau 3 : Quatre sites de référence Internet pour les indicateurs de qualité des terres.....	9
Tableau 4 : Organisations internationales ayant pour principal mandat la conservation des sols	10
Tableau 5 : Analyse de plusieurs séries d'indicateurs d'environnement.	20
Tableau 6 : Récapitulatif des indicateurs de l'OCDE par thème d'environnement	24
Tableau 7 - Paramètres biologiques, chimiques et physiques retenus par différents auteurs pour l'élaboration d'un indice de la qualité de l'eau aux Etats-Unis	25
Tableau 8 : Indicateurs de fonction de l'environnement	30
Tableau 9 : Modifications de la méthodologie de construction du IDH depuis sa création en 1990	32
Tableau 10 : Principaux mythes régissant la perception de l'environnement	36
Tableau 11 : Quelques caractéristiques des trois provinces pilotes.....	39
Tableau 12 : Données concernant les thèmes "Eaux et climat" et "Substrat".....	42
Tableau 13 : Occupation des sols dans la province de Thai Nguyen	47
Tableau 14 : Les principales causes de mortalité/morbidité à Thai Nguyen	52
Tableau 15 : Turbidité tolérable de l'eau selon les usages.....	53
Tableau 16 : Tableau comparatif des différents indicateurs de dégradation des forêts	58
Tableau 17 : Indicateurs de dégradation des forêts pour les hautes terres du Viet Nam	59
Tableau 18 : Tableau comparatif des différents indicateurs d'érosion des sols	60
Tableau 19 : Indicateurs de dégradation des sols pour les hautes terres du Viet Nam	60
Tableau 20 : Tableau comparatif des différents indicateurs de dégradation des eaux.....	61
Tableau 21 : Indicateurs de dégradation des eaux pour les hautes terres du Viet Nam.....	61
Tableau 22 : Indicateurs de dégradation des terres pour les hautes terres du Viet Nam	62
Tableau 23 : Variation du couvert forestier au Viet Nam de 1976 à 1995	63
Tableau 24 : Causes de déforestation et superficies concernées annuellement	64
Tableau 25 : Détermination des classes de pression sur la forêt.....	66
Tableau 26 : Détermination de l'indice d'état de dégradation des forêts.....	69
Tableau 27 : Classification nationale des "terres forestières" et superficies	70
Tableau 28 : Détermination de l'indice de réponse à la dégradation des forêts	71
Tableau 29 : Détermination des classes de susceptibilité des sols à l'érosion	73

Tableau 30 : Classes de susceptibilité des sols à l'érosion des régions du Viet Nam.....	74
Tableau 31 : Influence de l'inclinaison de la pente sur le risque d'érosion des sols.....	75
Tableau 32 : Influence de la morpho-pédologie sur la susceptibilité des sols à l'érosion	76
Tableau 33 : Influence des précipitations sur l'érosion des sols.....	77
Tableau 34 : Influence du couvert végétal et des pratiques culturales sur le risque d'érosion	78
Tableau 35 : Classes de risque d'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province.....	79
Tableau 36 : Détermination de l'extension de l'érosion.....	80
Tableau 37 : Classification du degré de l'érosion en nappe	80
Tableau 38 : Classification du degré d'érosion linéaire	81
Tableau 39 : Classes d'état d'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province.....	81
Tableau 40 : Classes de réponse à l'érosion des sols	82
Tableau 41 : Intensité de l'utilisation de l'approvisionnement en eau annuel.....	83
Tableau 42 : Détermination des classes de pénurie en eau	85
Tableau 43 : Investissements publics pour la gestion des ressources en eau	86
Tableau 44 : Indice de capacité de soutien des étiages.....	87
Tableau 45 : Détermination du risque de contamination fécale	88
Tableau 46 : Détermination des classes d'état de contamination fécale.....	90
Tableau 47 : Classes de réponse à la contamination fécale en milieu rural	91
Tableau 48 : Evolution de la superficie forestière et taux moyen de variation annuelle de cette superficie de 1943 à 1993	92
Tableau 49 : Répartition des forêts de la province de Thai Nguyen en fonction de leur fragilité à la déforestation (%)	96
Tableau 50 : Zones reboisées par plantation et régénération naturelle à Thai Nguyen	97
Tableau 51 : Superficie des sols par classe de risque d'érosion	98
Tableau 52 : Evaluation de l'état de l'érosion des sols à partir des signes visibles sur le terrain.....	99
Tableau 53 : Superficie des sols par classe d'état de l'érosion	100
Tableau 54 : Correspondance entre degré et pourcentage de pente.....	100
Tableau 55 : Occupation du sol sur les terrains dits forestiers, dont la pente est supérieure à 40%	101
Tableau 56 : Termes du bilan hydrologique des bassins du Song Cau et du Song Cong	103
Tableau 57 : Superficie des différents types d'occupation du sols par bassin versant.....	104
Tableau 58 : Consommation agricole en eau	105
Tableau 59 : Consommation annuelle en eau de Thai Nguyen	106
Tableau 60 : Débits des Song Cau et Song Cong	107

Tableau 61 : Débit minimum d'étiage du Song Cau et du Song Cong	107
Tableau 62 : Indice d'état de pénurie en eau	108
Tableau 63 : Volume effectif des réservoirs des provinces de Thai Nguyen et Bac Kan	109
Tableau 64 : Détermination de l'indice de capacité de maintien du débit minimum.....	110
Tableau 65 : Incidence des diarrhées à Thai Nguyen de 1996 à 1998	114
Tableau 66 : Résultats obtenus dans la détermination des indicateurs d'environnement	116
Tableau 67 : Évaluation de la qualité de l'eau de la rivière Cau	176
Tableau 68 : Évaluation des paramètres de qualité de l'eau pour l'alimentation en eau potable de la rivière Cau	177
Tableau 69 : Résultats de 8 analyses d'eau prélevées en novembre 1995	179
Tableau 70 : Résultats d'analyse d'échantillons d'eau prélevés dans la ville de Thai Nguyen en novembre 1995.....	179
Tableau 71 : Influence de l'intensité des pluies sur l'érosion du sol.....	184
Tableau 72 : Classification internationale d'Atterberg	185
Tableau 73 : Influence de la pente sur le ruissellement et l'érosion	187
Tableau 74 : Influence du couvert forestier sur l'érosion des sols au Viet Nam	188
Tableau 75 : Influence de la culture et de la rotation sur la résistance des sols à l'érosion	189
Tableau 76 : Influence du facteur couvert végétal (C) en Tunisie	189
Tableau 77 : Le facteur "pratiques antiérosives P"	190
Tableau 78 : Calcul de l'ETP pour le riz d'hiver/printemps.....	196
Tableau 79 : Calcul de l'ETP pour le riz de mousson.....	196

C. ENCADRES

Encadré 1: Agrégation de l'Indicateur de Développement Humain (IDH)	34
Encadré 2 : Définitions utilisées pour la forêt dans le cadre du programme STD3-CT94-0310..48	48
Encadré 3 : Critères de sélection des indicateurs.....	54
Encadré 4 : Les principales causes du déboisement au Viet Nam : théories et contradictions....	65
Encadré 5 : Deux paramètres fondamentaux de la qualité biologique de l'eau : les coliformes fécaux et la DBO₅	89
Encadré 6 : Statistiques d'hydraulique rurale de Thai Nguyen	105

INTRODUCTION

Dans le cadre d'une action de recherche financée par l'Union Européenne (DG XII) et coordonnée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM), la réalisation d'une base de données géographique a été entreprise pour trois provinces situées dans les zones de collines et de montagnes du Vietnam. Cette réalisation est menée en partenariat avec l'Institut de Géographie (IG) du Centre National des Sciences Naturelles et de Technologie du Viet Nam (CNST). Les trois provinces pilotes de Thai Nguyen, Bac Kan et Lam Dong ont été choisies par l'IG pour leur représentativité des conditions qui prévalent dans les hautes terres, lesquelles occupent 75 % de la superficie du pays.

L'objectif principal de ce projet STD3 - CT94-0310 de l'Union Européenne est de faciliter la prise de décision en matière de développement rural et de protection de l'environnement des hautes terres du Vietnam. À cet effet, les quatre activités suivantes seront menées :

1. Constitution d'une base de données sur trois zones pilotes des hautes terres du Vietnam. Cette base de données sera gérée par un système d'information géographique (SIG) et associée à l'utilisation de la télédétection.
2. À partir de la base de données, établissement d'un système d'information de l'environnement pour la gestion durable des hautes terres du Viet Nam. Le modèle devra être transposable hors des zones pilotes, d'abord au reste des hautes terres du Vietnam puis à d'autres pays de la région (Laos, Cambodge) placés dans des conditions similaires: relief accidenté, fortes pluies de mousson, forêt tropicale, nouveaux défrichements par des migrants, agriculture pluviale, risques très élevés de dégradation des sols.
3. Par le biais de la géographie médicale, établissement d'un lien entre les problèmes d'agriculture et de santé, en particulier concernant le paludisme, à l'état endémique dans les hautes terres.
4. Renforcement du potentiel de recherche du Vietnam qui assurera la maintenance du système mis en place, son amélioration et son expansion régionale.

Les moyennes et hautes terres tropicales disposent d'un large éventail de ressources naturelles (sols, eau, forêt, pâturages, faune sauvage, minéraux, etc.). Lorsque l'on est amené à mettre en valeur et à aménager ces ressources, on s'aperçoit vite que certaines formes d'exploitation sont complémentaires, alors que d'autres sont en concurrence. La clef d'un développement durable des moyennes et hautes terres tropicales réside en l'utilisation efficace et complémentaire des ressources naturelles pour répondre aux besoins pressants des populations, tout en perturbant le moins possible l'écosystème dans son ensemble.

Le bilan mitigé de ces dernières décennies en matière de développement des hautes terres tropicales montre que cet objectif est plus aisé à formuler qu'à réaliser. Les décideurs ont en général une bonne compréhension des principaux mécanismes de dégradation de l'environnement comme l'érosion des sols, le déboisement, la perte de biodiversité ou la pollution des eaux et de l'air. Par contre, ils ignorent souvent les liens de causalité qui unissent ces mécanismes et l'impact exact de différentes politiques de développement sur chacun d'entre eux. De plus, l'information à la fois précise et agrégée qui leur serait nécessaire pour une gestion durable des ressources naturelles fait souvent défaut, limitant leur capacité à résoudre les conflits de gestion de l'environnement de façon optimale.

L'établissement d'un système d'information de l'environnement est une condition préalable pour le développement durable du milieu naturel. En conséquence, un objectif majeur du programme STD3-CT94-0310 sera de développer un tel outil à partir de la base de données gérée par un SIG. La présente recherche se place dans le cadre de cet objectif.

Grâce à leur capacité de restitution graphique, les bases de données gérées par des SIG peuvent grandement faciliter une communication des données environnementales aux décideurs. Les SIG sont aussi par essence des outils intégrateurs qui obligent chaque spécialiste à choisir et à partager les données les plus critiques de sa discipline au sein d'une base de données commune. En ce sens, un SIG est un outil précieux d'aide à la décision. Le SIG développé par STD3 - CT94-0310 constituera la base du système d'information de l'environnement proposé pour le développement durable des hautes terres du Viet Nam.

Cependant, les SIG, même parfaitement conçus et réalisés, sont souvent difficiles à consulter et à exploiter. La complexité de l'outil informatique en limite la manipulation par les décideurs. La simple masse des informations disponibles peut souvent dérouter plus qu'aider à la décision. Le caractère éventuellement conflictuel et les relations hiérarchiques des données manipulées sont difficilement mis en évidence. En l'absence d'outils complémentaires de communication de l'information aux décideurs, les SIG se révéleront inadaptés à l'aide à la décision stratégique, qui se base sur des données statistiques très agrégées.

Pour faciliter la prise de décision stratégique, les données produites par un système d'information devront être directement assimilables par les décideurs concernés. Elles devront être communiquées aux décideurs à l'aide d'outils souples adaptés à la complexité des processus décisionnels, et permettre un dialogue étroit entre le décideur et l'analyste. Elles devront notamment être interprétées, nuancées, synthétisées et hiérarchisées.

Dans cet objectif, des indicateurs d'environnement seront développés par le projet STD3 - CT94-0310 pour faciliter l'analyse et la communication des informations disponibles au sein du SIG aux décideurs locaux. La présente recherche a pour objet de définir ces indicateurs d'environnement pour le développement durable des hautes terres du Viet Nam. Dans un premier temps, ces indicateurs ne seront développés à titre expérimental que pour la seule province de Thai Nguyen. Ils seront néanmoins sélectionnés de façon à pouvoir être aisément transposés aux deux autres provinces pilotes puis, éventuellement, à l'ensemble des moyennes et hautes du Viet Nam.

Ce document se compose de quatre parties distinctes. La première partie examine les principaux outils disponibles pour l'élaboration d'un système d'information de l'environnement et d'indicateurs d'environnement. La seconde partie décrit le dispositif expérimental du programme STD3-CT94-0310, l'état de l'environnement dans la province pilote de Thai Nguyen et propose un indicateur de pression, un indicateur d'état et un indicateur de réponse pour refléter chacun des quatre mécanismes majeurs de dégradation des hautes terres suivants : (i) déboisement et perte de biodiversité ; (ii) érosion des sols ; (iii) pénurie en eau ; et (iv) pollution de l'eau.

La troisième partie décrit les méthodologies retenues pour l'agrégation de ces différents indicateurs Pression-Etat-Réponse de dégradation des hautes terres tropicales. La quatrième partie analyse et présente de façon succincte l'état de dégradation des terres de la province pilote de Thai Nguyen à partir de ces indicateurs.

I LES SYSTÈMES D'INFORMATION DE L'ENVIRONNEMENT

1.1 LES OBJECTIFS DES SYSTÈMES D'INFORMATION DE L'ENVIRONNEMENT

La nécessité d'incorporer l'environnement dans tous les processus décisionnels pour promouvoir un développement durable a été fortement soulignée lors de la Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement (CNUED) organisée à Rio de Janeiro en 1992. Le chapitre 8-*Intégration des processus décisionnels pour l'environnement et le développement*- et le chapitre 40-*Information pour la prise de décision*- de l'*Agenda 21*¹ recommandent l'établissement de systèmes d'information pour faciliter l'intégration des processus décisionnels pour l'environnement et pour le développement.

Avant d'étudier les différents outils possibles pour la mise en place d'un système d'information de l'environnement (SIE), il convient de nous interroger sur ses objectifs spécifiques et ses utilisateurs potentiels.

1.1.1 Les objectifs et utilisateurs d'un système d'information de l'environnement

L'objectif général d'un SIE est de fournir aux décideurs le jeu d'informations nécessaire à une meilleure et plus rapide prise de décision au meilleur rapport efficacité/coût (K. McCloy, 1995). L'information à la fois précise et agrégée nécessaire à une gestion durable des ressources naturelles est rarement disponible au sein des systèmes d'information existants, limitant la capacité des décideurs à résoudre les conflits de gestion de l'environnement de manière optimale.

La prise de décision peut être assimilée à un cycle au travers duquel les problèmes sont identifiés, des politiques sont élaborées, mises en œuvre, évaluées et ajustées afin d'améliorer la situation. La figure 1 représente ce cycle de la prise de décision.

Identification du problème. L'information est générée par les scientifiques ou les utilisateurs directs des ressources naturelles à partir d'observations, de collecte de données et d'analyses de terrain. L'objectif de cette étape est souvent d'identifier la gravité des problèmes et leurs origines afin de les porter à l'attention des décideurs locaux. Le système d'information de l'environnement devra permettre une bonne description de l'état de l'environnement.

Élaboration des politiques. Sur la base des données collectées et de la gravité des problèmes identifiés, des politiques seront élaborées par les décideurs concernés et leurs conseillers techniques. Les problèmes d'environnement ont souvent des causes complexes et plusieurs alternatives sont généralement envisageables pour les résoudre. L'objectif de cette phase sera de sélectionner la "meilleure" solution possible en présence de différents critères de sélection et priorités.

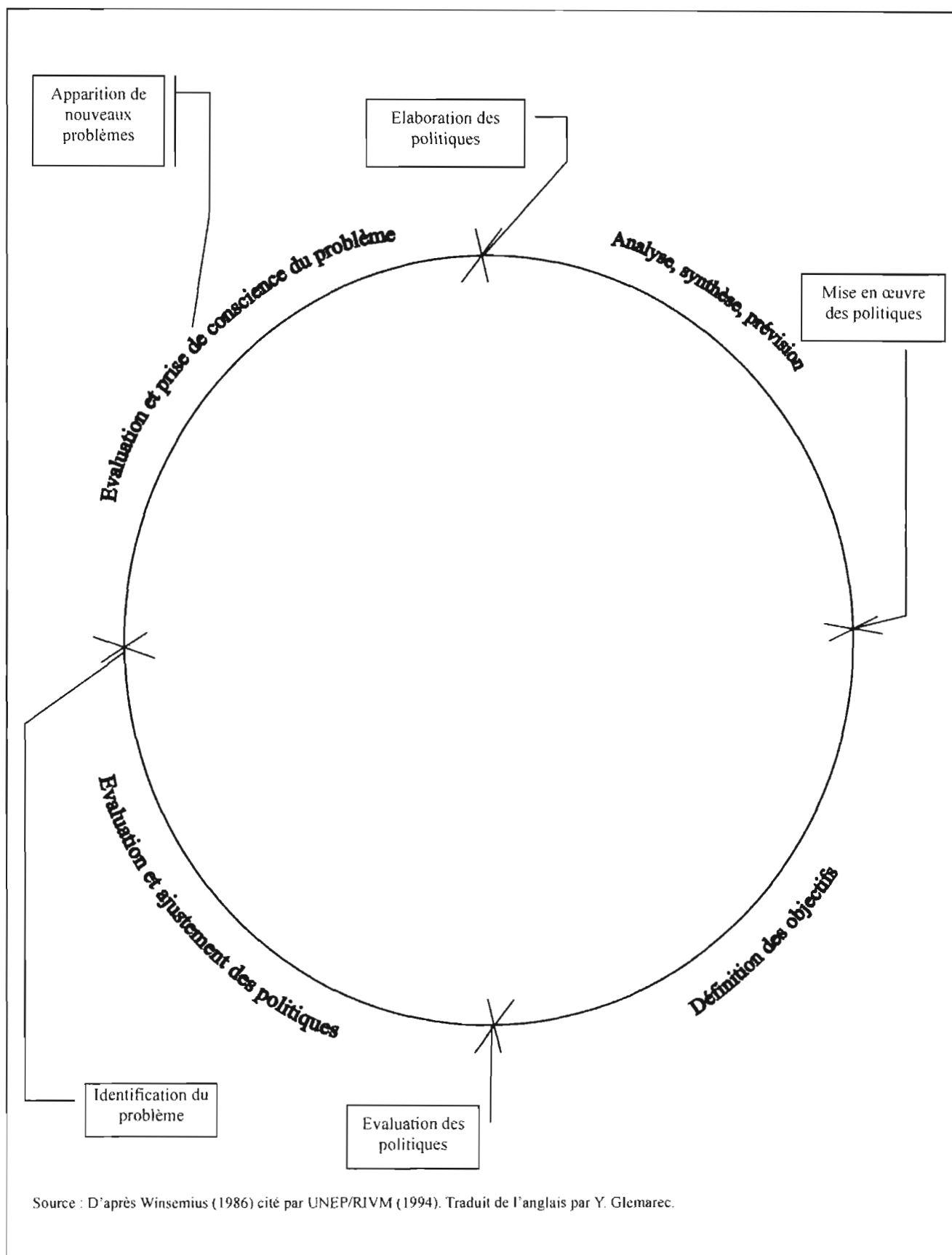
Mise en œuvre des politiques. Le système d'information de l'environnement devra permettre aux autorités de tutelle ainsi qu'aux agents économiques de vérifier le respect par tous les partenaires de la législation pour la protection de l'environnement.

Évaluation des politiques. Cette étape a pour objet d'évaluer l'efficacité des politiques mises en œuvre afin, au besoin, de les ajuster. Un système d'information de l'environnement devra permettre d'évaluer l'impact environnemental, économique et social des politiques élaborées.

Les objectifs et utilisateurs spécifiques d'un SIE varieront suivant le type de décision requise. Les données collectées par le SIE et leur degré de transformation devront donc être adaptées à ces différents objectifs et utilisateurs.

¹ L'Agenda 21 représente l'ensemble des recommandations émises par les groupes de réflexion préparatoires à la CNUED. Ce document fut approuvé lors de la conférence et a servi de référence pour la formulation de nombreuses stratégies nationales pour le développement durable.

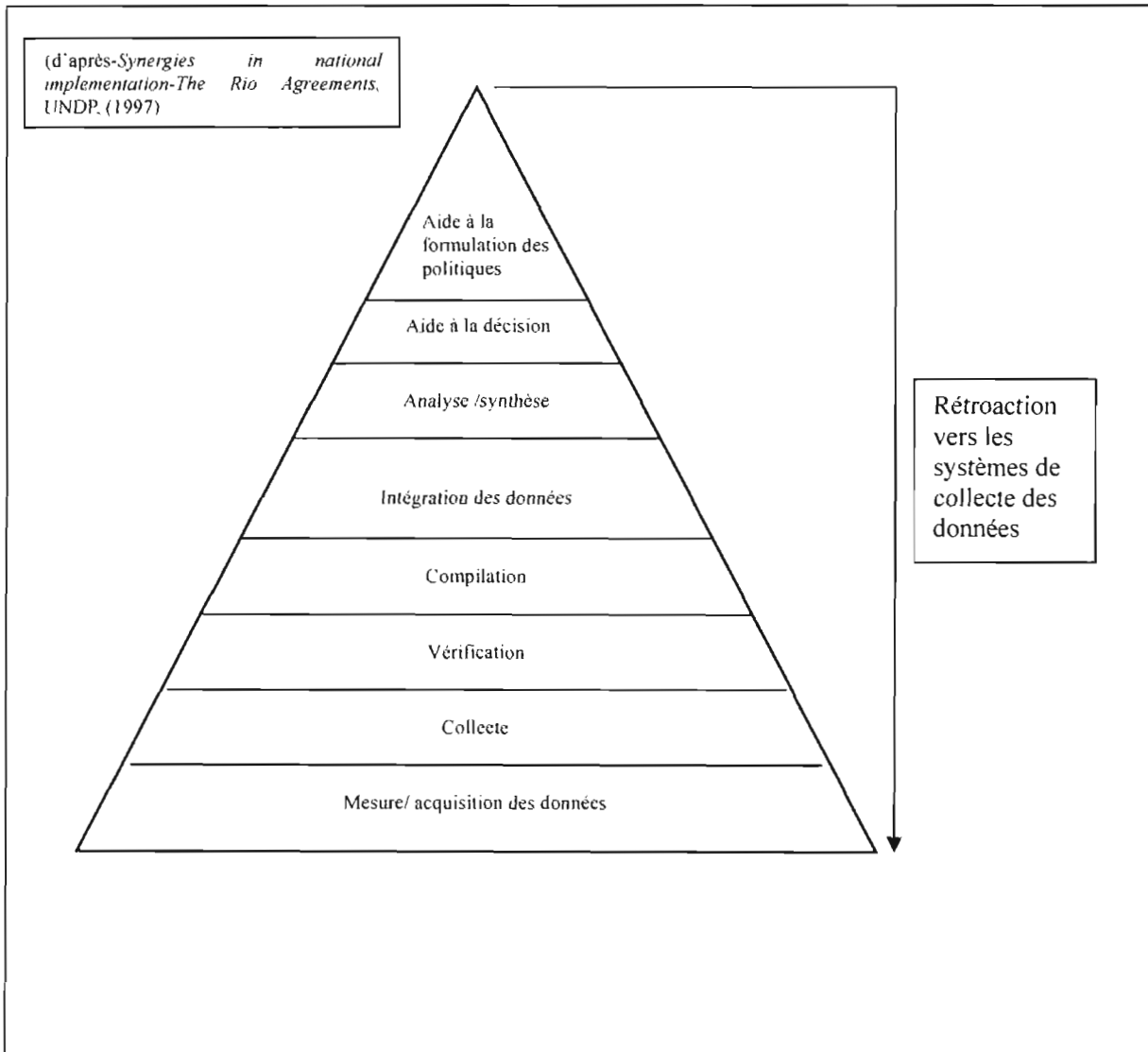
Figure 1 : Cycle de la prise de décision



1.1.2 Les étapes et outils pour l'établissement d'un système d'information pour l'environnement

La transformation de données environnementales en information pertinente pour la prise de décision est souvent visualisée sous la forme d'une pyramide de l'information, comme représentée par la figure 2. Les données brutes collectées sont vérifiées, compilées, intégrées, analysées et synthétisées à chaque échelon de cette pyramide jusqu'à ce qu'elles soient directement assimilables par les décideurs politiques pour la négociation et formulation de stratégies de développement.

Figure 2 : La pyramide de l'information



Les données sont définies comme des observations brutes nominales ou ordinales à propos d'un objet ou d'une surface. Bien que les données brutes puissent parfois être utilisées directement comme sources d'information, elles requièrent généralement un traitement préalable pour être assimilables. La radiance d'une surface est un exemple de donnée brute qui devra d'abord être traduite en différents types d'occupation des sols pour être directement accessible et pouvoir être considérée comme une information.

Alors qu'une carte d'occupation des sols pourra être directement utilisée par certains gestionnaires de l'environnement, cette carte devra bien souvent être intégrée à d'autres informations primaires comme

la susceptibilité des sols à l'érosion ou leur adéquation à un type de culture donné pour être utile à la prise de décision. Cette information secondaire devra souvent elle-même être traitée de nouveau pour aider réellement à la décision.

En accord avec cette pyramide de l'information, nous pouvons distinguer trois grandes étapes pour la mise en place d'un SIE efficace répondant aux attentes des différents groupes d'utilisateurs: (i) collecte et structuration des données couvrant tous les domaines du développement durable; (ii) développement d'outils d'analyses des données; (iii) développement d'outils de communication des données aux décideurs.

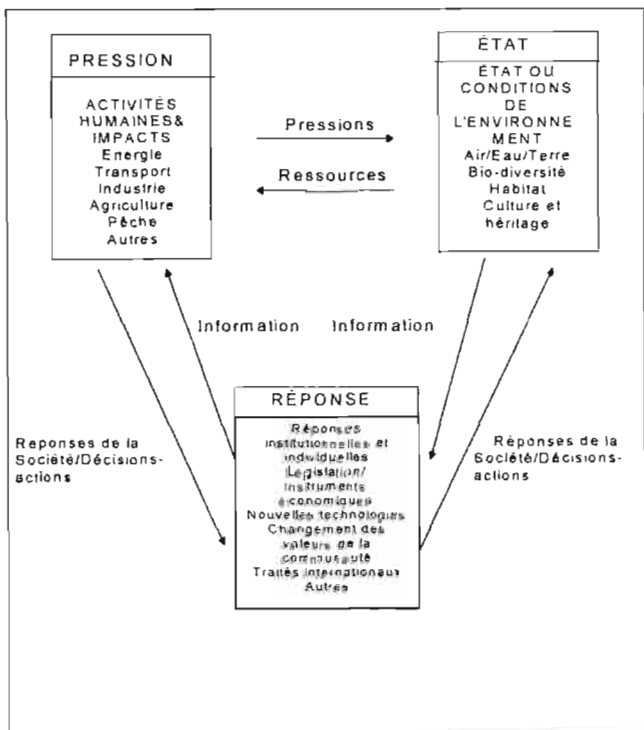
1.1.2.1 Collecte et structuration des données sur l'environnement

La constitution d'une banque de données exhaustive est la base d'un SIE. Les informations pour l'environnement couvrent un vaste champ de mesures scientifiques, statistiques, et autres données quantitatives et qualitatives. Ces informations peuvent être de nature biophysiques, socio-économiques ou politiques. Afin de structurer la collecte de l'information et d'en faciliter l'analyse, il est nécessaire d'adopter un cadre conceptuel pour la représentation de l'environnement.

Dans cet objectif, Friend et Rapport introduisirent en 1979 un cadre conceptuel appelé STRESS. Il fut popularisé par l'OCDE (1993) et est actuellement adopté par la plupart des agences internationales pour le développement durable.

Figure 3 : Modèle Pression - État - Réponse (STRESS) Source : PNUE (1995).

La figure 3 publiée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE -1995) représente ce concept. Une grande partie des activités humaines exerce des pressions sur l'environnement et en modifient l'état (utilisation de ressources naturelles rejet de déchets, etc.). Ces modifications d'état peuvent avoir un impact sur les fonctions vitales de l'environnement et, en réaction, donner lieu à des réponses de la société pour en atténuer les effets négatifs.



Ce concept Pressions-État-Réponses est utilisé dans presque tous les modèles de simulation d'impact sur l'environnement (Swart, Bakkes, Niessen, Rotmans, de Vries et Weterings, 1995). Il doit en grande partie sa popularité au fait qu'il puisse être utilisé tant au niveau international qu'au niveau national, ou encore à l'échelle d'une simple entreprise. Un système d'information intégré de l'environnement s'efforcera de collecter des données concernant ces trois sous-systèmes Pression-État-Réponse. Du fait de la diversité des informations nécessaires, il est généralement difficile de constituer une telle base de données. Le chapitre

40 de l'Agenda 21 souligne la nécessité d'améliorer la collecte, l'archivage et la diffusion de l'information de l'environnement aux différents utilisateurs :

"L'information dans de nombreux pays n'est pas gérée de manière adéquate, du fait de limitations financières et en personnel qualifié, d'une prise de conscience limitée de la valeur d'une telle information, et des demandes conflictuelles posées par d'autres problèmes urgents, spécialement dans les pays en voie de développement. Même lorsque l'information est disponible, elle n'est pas toujours

accessible, à cause soit de l'absence de technologie pour y accéder physiquement ou à cause des coûts financiers associés, particulièrement pour l'information détenue à l'extérieur du pays et disponible commercialement».

Tableau 1 - Évaluation de la qualité de l'information détenue dans les bases de données de l'environnement

Secteur	Qualité de l'info.	Principales lacunes des SIE existants
Risque de réchauffement climatique	D	Données parcellaires sur la température moyenne de l'océan, sur la température moyenne atmosphérique, sur le changement de niveau des océans, sur la fonte des glaces, sur les transports d'oxyde d'azote et les impacts socio-économiques des différents scénarios de changement climatique.
Réduction de la couche d'ozone	C	Mesures parcellaires des radiations ultraviolettes et de l'ozone troposphérique, compréhension limitée du comportement chimique des composés destructeurs de l'ozone et de leurs alternatives.
Biodiversité	D	Inventaire incomplet des espèces et des habitats, absence de mesures de santé des écosystèmes, absence d'estimation de la valeur économique des espèces.
Forêts tropicales	C	Absence de mesures régulières des superficies et taux de déboisement des forêts tropicales, absence d'estimation du rôle socio-économique des produits forestiers non-ligneux, compréhension limitée du rôle des forêts dans la stabilisation climatique.
Énergie	B	Inventaire limité des ressources renouvelables et de la contribution des émissions gazeuses à effet de serre.
Santé humaine	B	Absence de mesures précises dans de nombreux pays en développement de la morbidité et mortalité associées à la dégradation de l'environnement et à l'hygiène du milieu.
Conservation des sols	D	Mesures et études parcellaires de l'occupation des terres, de l'érosion des sols, du couvert végétal, de l'identification des sols fragiles, et de l'efficacité des mesures de conservation des sols.
Eau douce et Océans	C-	Absence de mesures de la pollution des eaux souterraines, de l'utilisation et de la pollution des eaux douces, de la sédimentation, de la pollution des eaux côtières, absence d'inventaire des organismes aquatiques vivants.
Qualité de l'air	D	Mesures parcellaires de la pollution de l'air en milieu urbain, de la qualité de l'air à l'intérieur des espaces habitables, et de la pollution atmosphérique à longue distance.
Agriculture	B+	Mesures et études parcellaires de la conservation de l'eau et des sols, de la biodiversité, et de l'impact des engrais, des insecticides et des herbicides sur l'environnement.
Déchets toxiques	D	Absence d'information sur les quantités de déchets toxiques produites, traitées, transportées, recyclées, et sur leurs effets induits sur la santé des populations et des écosystèmes.

Publié dans "The Challenge of Sustainability" (Kumar, Manning, Murck, 1993) d'après J.T Mathews (1991). "Moving Towards Eco-Development: Developing Environmental Information for Decision-Makers". Traduit de l'anglais par Y. Glemarec.

Le tableau 1 donne une estimation de la situation au niveau international. Les secteurs actuellement les mieux suivis sont l'agriculture (B+), l'énergie (B) et la santé des populations (B). Il n'est guère surprenant que les efforts les plus importants en matière de collecte de l'information se soient portés sur ces trois secteurs. L'agriculture et l'énergie ont des répercussions immédiates sur la croissance économique. L'impact de la dégradation de l'environnement sur la santé est toujours le premier facteur de mobilisation des populations pour l'environnement. Il est aussi relativement logique que des préoccupations plus récentes comme la conservation de la biodiversité (D) ou la conservation des sols (D) donnent lieu à une information nettement plus clairsemée.

Le développement des technologies d'information assistées par ordinateur a permis au cours de ces dernières années une collecte plus complète et une dissémination croissante de l'information pour l'environnement.

En matière de collecte de l'information, la télédétection est devenue essentielle pour une étude d'ensemble du milieu naturel. La télédétection est une technique scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées,

spatiales, terrestres ou maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (F. Bonn, G. Rochon, 1992).

L'analyse des images obtenues par télédétection a d'abord été faite de façon visuelle par l'interprétation de photographies aériennes (la photo-interprétation) pour les besoins d'un grand nombre de disciplines. Avec l'arrivée des images numériques, les systèmes d'analyse d'images utilisant divers types d'ordinateurs ont commencé à faire leur apparition. Leur développement a suivi celui, très rapide, de l'informatique, tant pour le matériel que pour les logiciels (F. Bonn, G. Rochon, 1992).

Un grand nombre de satellites de télédétection lancés par l'Agence spatiale européenne, le Brésil, le Canada, les États-Unis, la France, l'Inde et le Japon sont actuellement opérationnels. Les applications de ces satellites varient considérablement suivant les caractéristiques de leurs capteurs. Les trois systèmes les plus communément utilisés actuellement sont les satellites Landsat (Land satellite, E.U), Spot (Système probatoire d'observation de la terre, France) et NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer, E.U.). Les caractéristiques principales de différents capteurs disponibles sur ces trois systèmes sont présentées dans le tableau 2 pour en faciliter la comparaison.

Tableau 2 - Caractéristiques principales des différents capteurs de Landsat, SPOT et NOAA/AVHRR

	Landsat MSS	Landsat RBV	Landsat 4-5 TM	SPOT 1-2 HRV	NOAA/AVHRR
Bandes spectrales (µm)	0,5 à 0,6 MSS4 0,6 à 0,7 MSS5 0,7 à 0,8 MSS6 0,8 à 1,1 MSS7 10,5 à 12,4 MSS8 (Landsat 3)	0,5 à 0,75	0,45 à 0,52 TM1 0,52 à 0,60 TM2 0,63 à 0,69 TM3 0,76 à 0,90 TM4 1,55 à 1,75 TM5 10,4 à 12,5 TM6 2,10 à 2,35 TM7	0,50 à 0,59 XS1 0,61 à 0,69 XS2 0,79 à 0,90 XS3 0,51 à 0,73 (P)	0,55 à 0,68 0,73 à 1,1 3,55 à 3,95 10,5 à 11,5 11,5 à 12,5
Résolution au sol	80m 240 m IR therm.	40m	30m	20m (XS) 10m (P)	1100 m
Largeur de balayage	185 km	185 km	185 km	2 x 60 km orientable dans +/- 400 km	2700 km
Répétitivité	18 jours	18 jours	16 jours	26 jours accessibilité en tout point du globe en 5 jours maximum.	Quotidienne

(adapté de F. Bonn, G. Rochon, 1992, et K. McCloy, 1995).

Du fait de leur forte résolution au sol, les satellites SPOT permettent de créer des images satellites dont la limite de résolution spatiale et la précision géométrique sont équivalentes à des photographies aériennes à petite échelle. Les produits cartographiques dérivés des images SPOT peuvent répondre aux normes cartographiques à moyenne et grande échelle (échelles supérieures à 1/50 000 environ).

Les images Landsat ont une résolution plus faible (40-80 mètres) et seront utilisées pour des produits cartographiques à plus faible échelle (échelles inférieures à 1/50 000 environ). Elles seront par contre d'un emploi plus économique du fait de leur plus large balayage (185 km) dans le cadre de travaux cartographiques recouvrant de larges étendues.

Les satellites NOAA/AVHRR permettent des vues fréquentes de larges surfaces de la terre. Ils sont particulièrement adaptés à l'étude de phénomènes d'une grande variabilité à très petite échelle. De ce fait, ils sont appelés à prendre de l'importance dans le futur à cause des préoccupations mondiales sur les changements climatiques à l'échelle du globe. Les données relevées par ces satellites permettent en effet une mesure assez précise de la température de surface, en particulier pour les océans.

Du fait de la complémentarité des différents capteurs, il est courant qu'un projet géographique utilise conjointement une combinaison d'images satellites. Un projet d'évaluation de la production agricole à partir d'une base de données géographiques au 1/50 000 pourra utiliser à la fois des images Landsat et SPOT pour l'établissement de la carte d'occupation des sols et des images NOAA/AVHRR pour le suivi des récoltes. Les technologies de télédétection connaissent un développement très rapide et des images satellites d'une résolution au sol de 5 mètres sont disponibles commercialement.

En matière de dissémination de l'information, le réseau Internet qui recouvre actuellement l'ensemble de la planète et connectait plus de cent quarante millions d'utilisateurs en juin 1998, n'était constitué que de quatre ordinateurs en 1969. Plus de 700 millions d'utilisateurs devraient être connectés au réseau Internet d'ici 2001. En parallèle à l'augmentation exponentielle du nombre d'utilisateurs, nous assistons aussi à une explosion virtuelle du nombre de base de données qui peuvent être consultées sur Internet.

Cette richesse qui fait la force du réseau Internet en est aussi une principale faiblesse pour l'échange d'information. Une recherche sur la base de mots-clés tels que « indicateurs de qualité des terres » ou « gestion durable des terres » à l'aide de moteurs de recherche comme Infoseek, Lycos, ou Yahoo donnerait près d'un million de résultats positifs. Seule une très faible proportion de ces résultats se révélerait pertinente. Heureusement, plusieurs organisations ont pris l'initiative de créer des catalogues de base de données disponibles sur le réseau. Le tableau 3 fournit une liste de quatre sites offrant un catalogue de base de données disponibles dans le domaine des indicateurs de qualité des terres.

La plupart des agences nationales pour l'environnement disposent de bases de données et de centres de référence reliés aux grands réseaux mondiaux. Dans le domaine de la conservation des sols, plusieurs agences internationales jouent aussi un rôle critique en matière d'échange de l'information. Le tableau 4 recense quatre de ces institutions.

Les progrès enregistrés dans le domaine des technologies de l'information devraient permettre de résoudre en partie les contraintes technologiques actuelles en matière d'accès et d'échange de l'information pour l'environnement. De plus amples efforts nationaux et internationaux en matière de collecte des données sont néanmoins nécessaires pour améliorer la qualité de l'information détenue dans les bases de données de l'environnement.

Tableau 3 - Quatre sites de référence Internet pour les indicateurs de qualité des terres

Nom	URL	Compilateur	Contenu
Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives and Publications	iisd1.iisd.ca/measurement/compendium.htm	International institute for Sustainable Development, Environment Canada, Redining Progress et la Banque mondiale	Vue d'ensemble des initiatives menées pour l'élaboration d'indicateurs de développement durable au niveau international et au Canada
Consortium for International Earth Science Information Network (CIESEN)	www.ciesin.org/	Consortium for International Earth Science Information Network (CIESEN)	Inventaire et liste de publications dans le domaine des indicateurs de qualité des terres
LQI News	www.esd.worldbank.org	Groupe de travail international sur les indicateurs de qualité des terres (Banque mondiale, FAO, PNUE, PNUD)	Information sur les initiatives menées dans le domaine des indicateurs de qualité des terres.
World Resources Institute (WRI)	www.wri.org/wri/index.html	World Resources Institute.	Résumés des travaux menés par le WRI dans le domaine des indicateurs d'environnement

Tableau 4 - Organisations internationales ayant pour principal mandat la conservation des sols

Institutions	Mandat
Centre International de Référence et d'Information pour la Conservation des sols (International Soil and Reference Information Center). Wageningen, Pays-Bas.	Fondé en 1966, l'ISRIC est un centre de documentation, de recherche et de formation pour la gestion des sols, se concentrant plus particulièrement sur les ressources des pays en voie de développement. Le CIRI collecte, gère et transfère des informations sur les sols et participe à des programmes internationaux tels que SOTER et WOCAT.
Conseil international pour la recherche et la gestion des sols, Bangkok, Thaïlande.	Le CIRGS fut fondé en 1983 pour promouvoir et participer aux efforts de recherche en matière de conservation des sols et d'aménagement du terrain.
L'Association internationale pour la conservation des sols et de l'eau, Ankeny, E.U.	Fondé en 1983, l'AICSE recense près de 700 membres. Elle organise des séminaires spécialisés, publie un bulletin d'information trimestriel et met en œuvre le programme de recensement mondial des approches et techniques de conservation de l'eau et des sols (<i>World Overview of Conservation Approaches and Technologies</i>). Ce programme lancé en 1992 a pour objectif de recenser, d'évaluer et de publier sous formes de rapports, de cartes, de bases de données et de systèmes experts l'expérience existante en matière de conservation des sols et de l'eau.
L'Organisation internationale pour la conservation des sols.	Fondé en 1983, l'OICS organise des conférences internationales pour promouvoir la conservation des sols et la gestion durable des ressources naturelles. L'OICS est basée dans le pays d'accueil de la prochaine conférence.

D'après L'Organisation internationale pour la conservation des sols (1996).

1.1.2.2 Analyse de l'information

Si améliorer la collecte et l'archivage de l'information doivent être regardées comme des priorités pour la mise en place de systèmes d'information de l'environnement, une partie importante des besoins en information pourrait être comblée par une meilleure analyse des données existantes (Kumar, Manning, Murck, 1993). Par exemple, 5% seulement des données enregistrées par les systèmes satellites Landsat sont actuellement analysés (Environnement Canada, 1992, cité par Kumar, Manning, Murck, 1993).

De même que pour la collecte et l'archivage des données, le développement des technologies de traitement d'information assistées par ordinateurs ouvre des horizons nouveaux pour cette analyse (Kumar, Manning, Murck, 1993). Deux nouveaux outils facilitent notamment l'analyse de l'information : les systèmes d'informations géographiques (SIG) et les modèles numériques.

a. Les systèmes d'information géographiques

Le concept de SIG a été défini de diverses façons selon les auteurs. La définition suivante semble toutefois rassembler un large consensus : «Un système d'informations géographiques réunit les techniques et méthodes d'acquisition d'informations spatialement référencées, de leur codage sous forme vectorielle ou matricielle, leur organisation en banque de données ainsi que les divers traitements et procédures destinés à les adapter à leur utilisation. Un système d'information géographique a pour but de fournir aux planificateurs et gestionnaires du milieu les informations nécessaires à la prise de décision» (Caloz, 1990, rapporté F. Bonn et G. Rochon, 1992).

Le cœur d'un SIG est constitué d'un système de gestion d'une base de données relationnelle². Chaque information séparée, enregistrée dans la base de données, est spatialement référencée. Ceci permet de représenter différents thèmes d'informations (sols, routes, etc.) sous forme de cartes thématiques indépendantes appelées *couverture*. Les différentes couvertures d'un SIG pourront être analysées et imprimées séparément ou croisées selon les besoins. Ce concept de couverture est extrêmement important pour la compréhension de l'organisation logique des SIGs, car il en constitue le point focal autour duquel vient s'appuyer l'ensemble de l'organisation du système. La figure 4 représente les différentes couvertures de base généralement enregistrées dans un SIG pour la gestion du milieu naturel.

Étant donnée l'importance croissante des SIG pour la gestion de l'environnement et le rôle primordial qu'ils jouent dans la présente étude, nous présenterons ici brièvement leurs principales fonctionnalités. Comme noté par F. de Blomac (1994), décrire les fonctionnalités d'un SIG n'est pas chose aisée pour plusieurs raisons. La première provient du fait que les SIG manipulent des données spatiales très riches par nature, entretenant entre elles des relations complexes et se prêtant à un grand nombre d'analyses spatiales et d'applications. La seconde est que les SIG sont à la convergence de plusieurs sciences et techniques : géodésie, topographie, cartographie, informatique, géographie dans son sens le plus large et autres disciplines faisant appel à des données à références spatiales (certains auteurs ont repris le terme de géomatique pour désigner l'ensemble de ces disciplines). À titre d'introduction, les principales fonctions suivantes peuvent être néanmoins retenues :

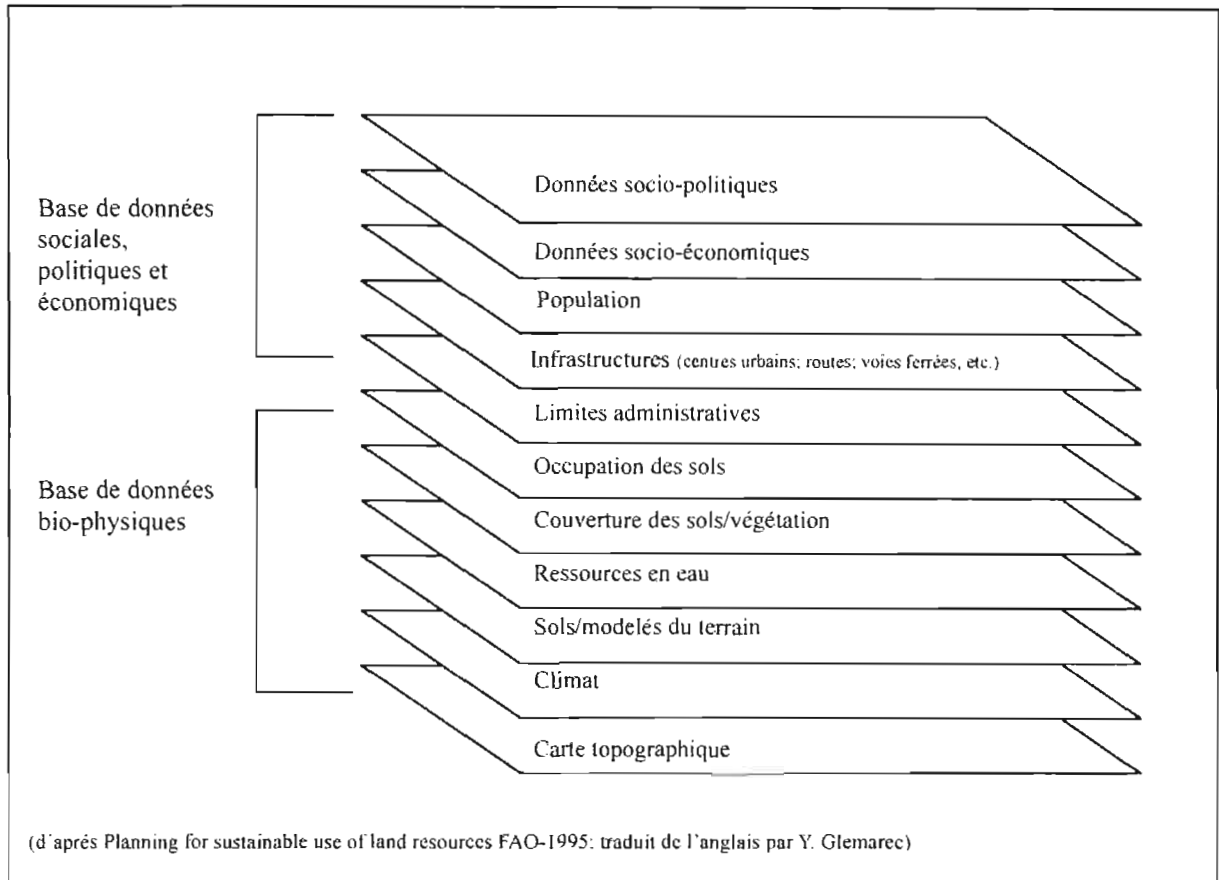
Intégration, structuration et protection des données. Un des problèmes majeurs en matière de gestion du milieu est la diversité des formats et des échelles utilisés pour la collecte, l'archivage et la communication des données de l'environnement. Ces données peuvent en effet prendre la forme de cartes à différentes échelles, de photographies, de tableaux de statistiques, de rapports narratifs. Une telle diversité a souvent été une contrainte majeure à leur intégration dans les processus décisionnels (FAO, 1995). Un SIG permet d'intégrer de façon simple des données graphiques et non graphiques en un ensemble cohérent se prêtant à des traitements d'interrogation et d'analyses. Un second problème majeur est la perte d'information du fait d'un archivage inadéquat. Le SIG, en centralisant l'information et en permettant de la dupliquer à volonté, la protège aussi contre la perte, la dégradation ou le vol (G. Korte, 1992).

Mise à jour élémentaire des données. Bien qu'ils aient fortement progressé au cours de ces dernières années, les procédés de mise à jour manuelle des cartes restent onéreux et contraignants. Par rapport aux techniques de cartographie traditionnelle, les SIG autorisent une mise à jour extrêmement rapide des cartes à mesure que de nouvelles données sont disponibles. Les SIG se traduisent donc souvent par une bien plus grande qualité de ces cartes (G. Korte, 1992).

Analyse des données. Les SIG offrent de nombreux outils d'analyses qui prennent en compte la composante spatiale de l'information. L'analyse spatiale met en évidence des relations de proximité, d'inclusion, de juxtaposition, ou sert à identifier et à quantifier des espaces qui présentent certaines combinaisons particulières de valeurs que l'on traduit souvent en niveau de contraintes (F. de Blomac, 1994). Les principales catégories d'analyse spatiales suivantes peuvent être distinguées :

²Une base de données relationnelle enregistre l'information dans une collection de tables, chacune contenant des données sur un sujet particulier. Ces tables possèdent en commun un champ de données qui permet de les interconnecter. Il est ainsi possible d'utiliser des données de plusieurs tables à la fois. Ce système d'enregistrement de l'information est très efficace car il permet de n'enregistrer toute donnée qu'une seule fois, ce qui réduit les besoins en unités de stockage et permet des mises à jour et des recherches de données plus rapides.

Figure 4 : Couvertures de base d'un SIG pour la gestion des ressources naturelles



1. Analyse par croisement thématique. Les fonctions de croisement sont utilisées à chaque fois qu'il est besoin d'évaluer des combinaisons de facteurs décrits dans plusieurs couvertures et associés à des entités de formes disparates. Elles sont à la base de toutes les évaluations multicritères comme la quantification de l'impact sur l'environnement de l'implantation d'une infrastructure routière, qui devra prendre en compte des informations aussi diverses que celles des pentes, de l'occupation des sols, la diversité biologique et la vulnérabilité des sols à l'érosion.
2. Analyse de proximité. Elle permet de déterminer des zones de proximité par rapport à des phénomènes donnés. Un exemple d'application sera la détermination de zones d'exclusion autour d'espaces protégés.
3. Analyse de réseaux géographiques. Elle permet les analyses relatives au calcul du plus court chemin ; par exemple, l'optimisation de parcours ou l'implantation de sites de services urbains.

Restitution graphique et consultation. La cartographie est un des mécanismes les plus anciens et les plus efficaces d'analyse et de communication de l'information géographique. Il est plus aisé de communiquer une information complexe à partir de cartes qu'à partir de tableaux ou de listes, car les cartes utilisent pleinement notre capacité naturelle à distinguer les couleurs, formes et relations spatiales (ESRI, 1996).

b. Les modèles numériques

Les modèles numériques constituent le second outil majeur d'analyse des données. Les SIG et les modèles sont généralement utilisés en association étroite. Il existe deux grands types de modèles : les modèles d'estimation et les modèles de simulation.

Les modèles d'estimation ont pour objet d'extrapoler une seconde série de paramètres à partir d'une première série à un moment donné dans le temps. En matière de gestion du milieu, les modèles d'estimation se révéleront particulièrement utiles pour interpréter les images satellites et les traduire en types d'occupation des sols. Ils permettront aussi de réduire la collecte d'informations par les méthodes traditionnelles de relevés de terrain.

Les modèles de simulation utilisent une information quantitative sur les conditions d'une série de paramètres à un moment donné dans le temps et projettent cette information dans le futur à l'aide d'algorithmes qui estiment les changements qui se produiront en postulant un certain nombre de conditions. Par exemple, un modèle de simulation de croissance des végétaux pourra utiliser des mesures d'indice de superficie de feuilles (ISF) comme point de départ et bâtir des sous-modèles de croissance végétale pour estimer l'ISF à un moment donné dans le futur. Les sous-modèles de croissance végétale pourront nécessiter comme données brutes le type de sol, la pente, les pratiques culturales et les conditions climatiques.

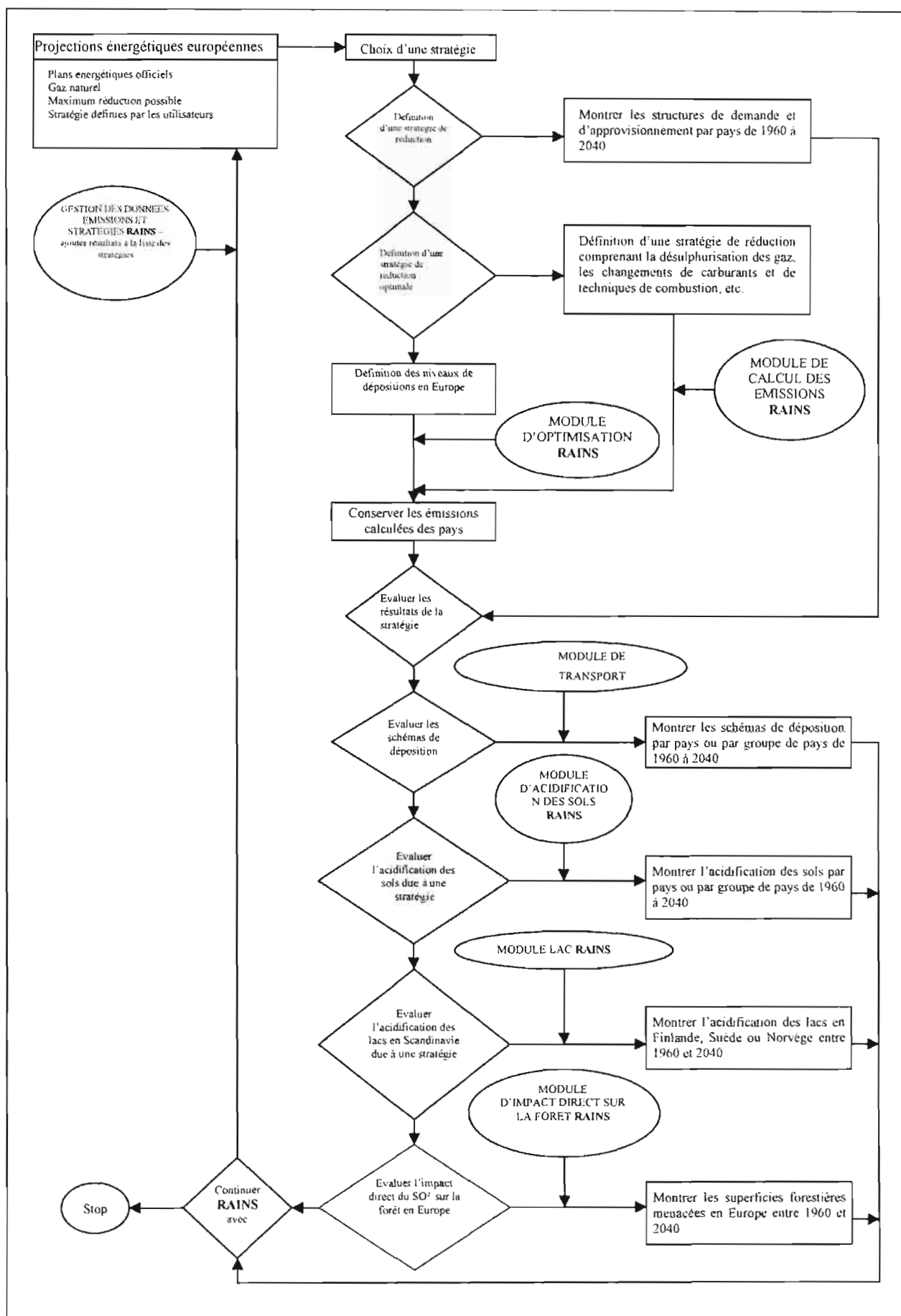
La gestion durable des ressources naturelles exige l'étude de l'impact à long terme des décisions affectant ces ressources. Les modèles de simulation sont des outils particulièrement adaptés pour mener à bien ce type d'analyse. Pour ce faire, ils exigent au préalable l'établissement de bases de données spatialement référencées pour tous les paramètres relatifs à la gestion des ressources naturelles. Les modèles interviendront donc dans la chaîne de l'information tant au niveau de la collecte que de l'interprétation ou de l'analyse des données, le plus souvent en association ou comme composant des SIG.

Il ne saurait être question dans le cadre de ce document de dresser un historique des principaux efforts menés en termes de modélisation. Il nous est néanmoins possible de distinguer deux grandes étapes en matière de modélisation de l'environnement. Jusqu'à très récemment, la plupart des efforts en matière de modélisation avaient pour objet de résoudre un problème spécifique (pluie acides, contamination des aquifères, érosion des sols, etc.).

Le modèle de simulation des pluies acides RAINS constitue peut-être l'exemple le plus célèbre de ces efforts. Ce modèle, représenté à la figure 5, fut utilisé avec succès lors des négociations sur les pollutions atmosphériques à longue distance en Europe (Hettelingh *et al.*, 1992, cité par R. Swart, J. Bakkes *et al.*, 1995).

Suite à la Conférence de Rio, plusieurs initiatives ont été menées pour essayer de modéliser les interactions entre développement et environnement. À titre d'illustration, la figure 6 reproduit le concept général du modèle intégré TARGET. Ce modèle a pour objet d'analyser à une petite échelle les interactions entre les processus socio-économiques et biophysiques et leurs impacts sur les écosystèmes et les populations. Les différents modules du modèle sont organisés selon le concept Pression-Etat-Réponse. TARGET peut être visualisé sous la forme d'une matrice bidimensionnelle dont les colonnes décrivent la chaîne de causalité pour un objet donné et les lignes les liens entre différentes pressions, états et impacts.

Figure 5 : Le modèle d'acidification RAINS ; Hetteling (1990) cité par L. Swart, J. Bakker *et al*, 1995



1.1.2.3 La communication de l'information aux décideurs

a. *Les contraintes à une intégration des données de l'environnement dans la prise de décision*

Malgré les progrès en matière de technologies de l'information, le PNUE dressait dans son "Guide to Information Management in the context of the Convention on Biological Diversity" le constat suivant quant à l'impact des systèmes d'information de l'environnement sur la prise de décision pour le développement durable :

"It has become clear that the major obstacles to increased use of information in decision-making are organizational, not technological in nature, meaning that investments in information technology alone will not provide a solution. We know the causes of many key environmental challenges and we know how to collect and analyse data about them. We also know how to build information systems to manage the data we collect and, for example, summarize information on the status and distribution of biological resources. Such systems have been implemented in many parts of the world.

Scientific information is only one factor affecting the way in which decisions on biodiversity are made, and is not always the most significant. Other means include political judgement, legal and financial necessity, personal or group bias, and commercial or international pressure".

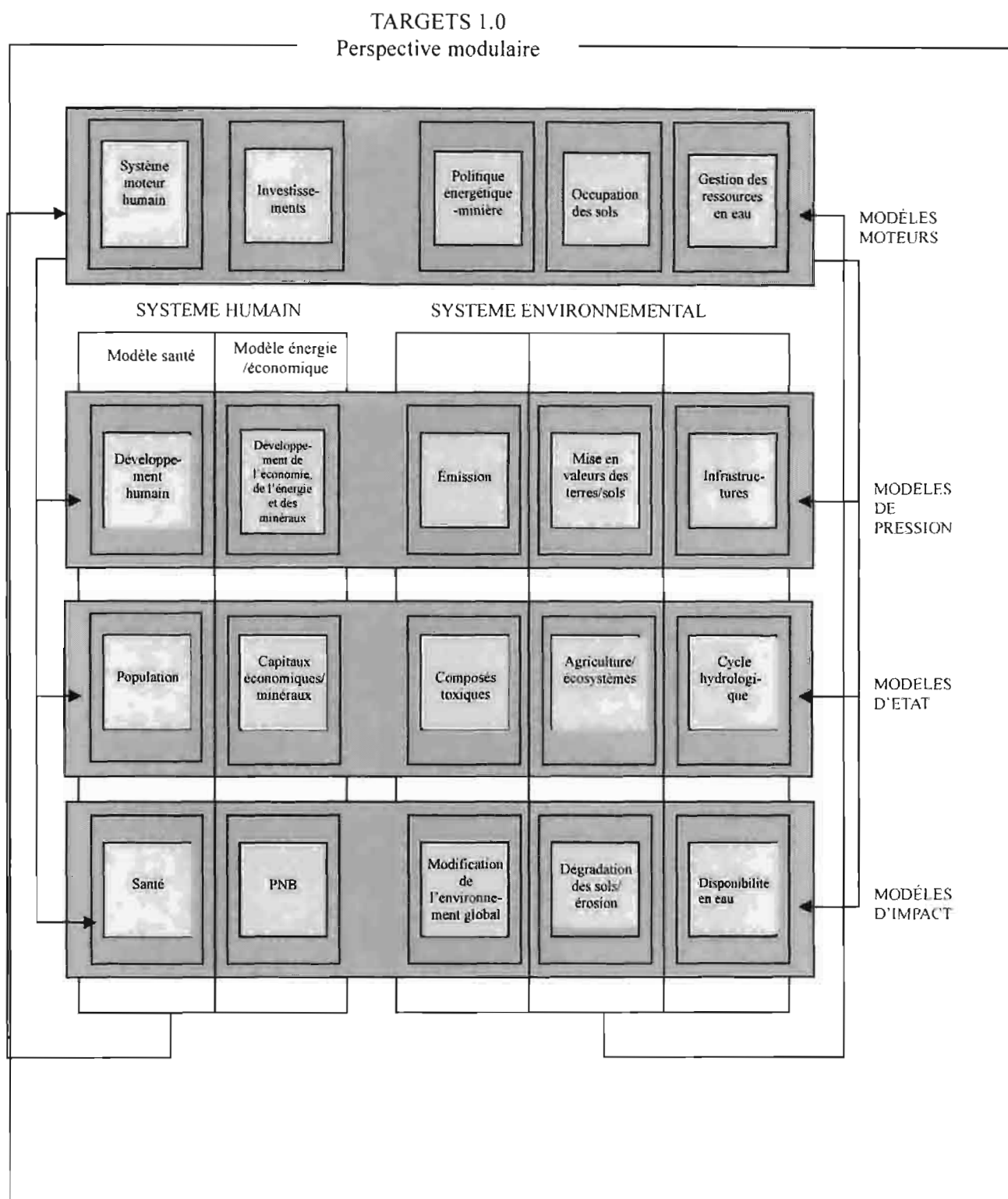
L'importance de ce dernier point, le fait que les processus décisionnels ne répondent pas à une logique scientifique mais à des motivations politiques, financières et juridiques, a été amplement discuté par Lucien Sfez dans son ouvrage "Critique de la décision" (1992). Après avoir mis en évidence combien la plupart de nos systèmes d'information pour la décision reposent sur la thèse classique de la décision en trois points : préparation-décision-exécution, Lucien Sfez souligne que "en suivant ces étapes de la décision la plus classique, on affirme un principe de cohérence, principe qui aura raison de la diversité des actions, de leur irrationalité fréquente, des enchevêtrements de "mobiles" auxquels sont soumis les acteurs... si acteurs il y a".

Les décisions sont le résultat d'un processus complexe qui s'étale dans le temps (Sfez, 1992). Il est souvent impossible d'identifier clairement le moment donné où une décision est prise, si moment il y a, et le décideur qui l'a prise, si décideur il y a. Il est préférable de parler de processus décisionnel plutôt que de décision (H. G. Zoller, H. Beguin, 1992). Le terme de processus suggère deux éléments clés de la prise de décision ; que la décision consacre l'aboutissement de consultations/négociations plus ou moins longues et qu'elle met en jeu un groupe d'intervenants au sein duquel valeurs et intérêts ne sont pas forcément convergents et dont les membres ne sont pas égaux en influences. Comme souligné par H. Zoller et H. Beguin, "plus nombreux seront les intervenants, plus complexe sera le processus collectif, d'autant plus difficile à appréhender de l'extérieur que les processus d'arbitrage entre les parties en cause sont rarement publics".

Malgré la complexité des processus décisionnels, la majorité des systèmes d'information de l'environnement les réduisent en un problème simple, ramassé en un moment déterminé et court. Cette logique suppose que la préparation d'un rapport synthétisant des faits scientifiques irréfutables et des alternatives rationnelles permettra, une fois présenté à l'autorité compétente, une décision appropriée.

Ce schéma linéaire simple n'est qu'un cas extrême et rare (Sfez). L'information est souvent utilisée pour la mise en œuvre d'une décision prédéterminée et non pour la décision elle-même. Elle est parfois manipulée pour suggérer une stratégie qui est prédéterminée par le décideur, ou tout autre personne (K. McCloy, 1995). Pour intégrer l'environnement dans la prise de décision, une étape majeure sera de reconnaître la complexité des processus décisionnels à défaut de pouvoir pleinement les appréhender, et d'essayer de développer des outils souples adaptés à cette réalité.

Figure 6 : TARGETS - Modèle intégré de développement durable TARGET d'après Rothmans et al. (1994), cité par L.Swart, J.Bakker, 1995



Une première condition pour une meilleure intégration des données environnementales dans la prise de décision sera l'établissement d'un dialogue entre l'analyste et le décideur (Sfez, 1992). Le fait que les décisions soient le résultat d'un processus complexe exigera le développement d'outils permettant des

allers et retours constants entre l'analyste et le décideur. Le développement des modèles de simulation ou autres instruments d'étude analytiques facilite, au travers de l'élaboration de plusieurs scénarios, l'établissement d'un tel dialogue.

Cette possibilité d'interaction entre le décideur et l'analyste n'est cependant pas toujours exploitée, et les scénarios générés par ces instruments sont souvent présentés aux décideurs comme des prédictions absolues. Une telle approche conduira les décideurs à perdre tout intérêt pour ces outils d'aide à la décision lorsque leurs prédictions ne se révéleront pas strictement exactes.

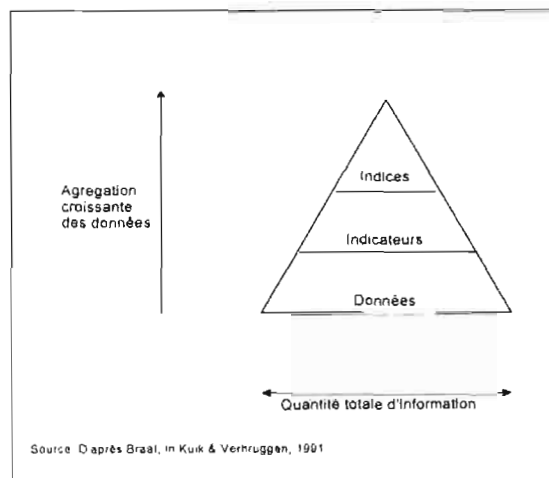
Une seconde condition sera d'adapter les produits d'informations aux différents niveaux de prise de décision. K. McCloy (1995) distingue trois grands niveaux de prise de décision :

1. *La planification stratégique.* Elle a pour objet la définition des objectifs à long terme d'une politique ou d'une organisation et la mobilisation des ressources pour atteindre ces objectifs. La prise de décision en matière de planification stratégique se basera généralement sur des données statistiques très agrégées. Ces données pourront être présentées sous forme de tableaux ou de cartes.
2. *La programmation.* Elle a pour but de traduire les objectifs et plans stratégiques en des programmes pouvant être mis en œuvre par des unités spécifiques de l'organisation, en accord avec les ressources disponibles et les besoins futurs. La prise de décision en matière de programmation se basera sur des modèles de simulation rigoureux et des bases de données exhaustives.
3. *Le contrôle opérationnel.* Il a pour but la gestion du personnel et autres ressources engagées dans la réalisation d'un programme donné au niveau d'une unité de l'organisation. Il se préoccupe de la gestion de l'organisation au jour le jour. La prise de décision se basera sur des données extrêmement précises mais généralement simples comme les quantités d'un élément donné.

Les SIG, même parfaitement conçus et réalisés, sont difficiles à consulter et à exploiter (Darracq, Brabant, Nguyen Tran Cau, Le Duc Can, 1995). La complexité de l'outil informatique par lui-même en limite la manipulation par les décideurs politiques. La simple masse des informations disponibles peut souvent dérouter plus qu'aider à la décision. Le caractère éventuellement conflictuel et les relations hiérarchiques des données manipulées peuvent difficilement être mis en évidence. Les modèles numériques et les SIG, qui sont d'excellents outils d'analyse et d'aide à la décision en matière de programmation, se révèlent souvent inadaptés aux besoins en informations des décideurs politiques pour la planification stratégique, qui se base sur des données statistiques très agrégées.

En l'absence d'une pleine compréhension par les décideurs politiques des fonctionnalités des SIG, les fonds ont souvent manqué pour leur mise à jour, réduisant progressivement leur utilité. De ce fait, de nombreux projets de SIG se sont en pratique limités à la production d'atlas et autres produits cartographiques. Des outils spécifiques de communication aux décideurs devront être développés pour permettre une pleine utilisation des résultats des modèles numériques et des SIG pour la prise de décision stratégique.

Figure 7 : Représentation des indicateurs et indices selon le modèle de la PYRAMIDE DE L'INFORMATION



b. Les outils de communication de l'information aux décideurs

Une première étape pour le développement de tels outils sera l'interprétation et l'agrégation des données environnementales. Il a été souvent reproché aux SIE de créer des outils riches en données statistiques mais pauvres en informations pertinentes pour les décideurs (USEPA, 1995). La langue de l'ingénieur n'est pas celle du décideur. Alors que les scientifiques engagés dans l'identification des problèmes regarderont comme information les données scientifiques et statistiques brutes collectées, ces mêmes données ne seront information pour les décideurs qu'une fois analysées et agrégées.

Les rapports sur l'environnement prennent souvent la forme de longs tableaux de statistiques et de données d'analyses physico-chimiques sans interprétation de ces résultats ni des tendances qui s'en dégagent. Le Chapitre 40 de l'Agenda 21 souligne la nécessité de *"transformer l'information existante en des formes plus utiles pour la prise de décision et plus adaptées aux besoins des différents groupes d'utilisateurs"*. Ce point est fortement souligné par Kumar, Manning et Murck (1993), *"A data set only becomes information when it is accessible and understandable"*.

Un des principaux mécanismes pour une telle interprétation et agrégation est l'élaboration **d'indicateurs et d'indices de l'environnement**. L'objectif des indicateurs et indices est de simplifier, synthétiser et interpréter un grand nombre de données pour les rendre directement intelligibles par des décideurs. Ce point est mis en évidence dans une seconde représentation de la pyramide de l'information donnée figure 7. Dans cette seconde pyramide, les données primaires acquises au travers d'un programme de mesure forment la base de la pyramide de l'information et sont progressivement converties en indicateurs et indices. Ces fonctionnalités complètent étroitement celles d'une approche cartographique en matière d'agrégation et de présentation de l'information aux décideurs. En ce sens, les indicateurs et indices de l'environnement pourront être utilisés, soit indépendamment, soit en association étroite avec des SIG, pour communiquer des données environnementales aux décideurs.

L'élaboration, les potentialités et les limites des indicateurs et indices de l'environnement sont développées en détail au chapitre suivant.

1.2 LES INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

1.2.1 Les distorsions statistiques en matière de gestion de l'environnement associées aux indicateurs macro-économiques

Le terme "indicateur" provient du verbe latin "indicare" qui signifie révéler, faire savoir, estimer ou mettre un prix (Hammond and al., 1995). Certains indicateurs très agrégés comme le produit national brut (PNB) ont pour objet de simplifier et de présenter un grand nombre de données statistiques, scientifiques ou économiques de manière directement accessible pour un public non spécialisé. D'autres indicateurs simples à un seul paramètre, comme l'aiguille d'une horloge ou le mercure d'un baromètre, permettent de rendre compte immédiatement de phénomènes ou de tendances difficilement perceptibles.

Les indicateurs influencent tous les domaines des activités humaines. Une chute du CAC 40 ou un ralentissement de la croissance du PNB affectent immédiatement les décisions d'investissements des institutions, des sociétés privées et des particuliers. Les indicateurs sont des instruments de pesée intellectuels ayant pour objectif de représenter aussi fidèlement que possible une certaine réalité. Comme toute représentation intellectuelle, la construction d'un indicateur agrégé est rarement libre de préjugés. Ces préjugés peuvent avoir des conséquences pratiques très négatives à long terme.

En France, dans une proposition à la Commission des Comptes de la Nation, M. Bertrand de Fontenelle soulignait dès 1966 les "préjugés statistiques" liés à l'élaboration de la comptabilité nationale et des indicateurs macro-économiques, et leurs conséquences négatives sur la protection de l'environnement et le bien-être social.

La Comptabilité Nationale ne retient comme biens et services que ceux qui s'échangent effectivement sur le marché ou qui sont susceptibles de s'y échanger. De là, trois conséquences logiques :

- a. *Les services rendus à titre gratuit ne figurent pas dans les flux positifs.*
- b. *Les nuisances produites ne figurent pas comme flux négatifs.*
- c. *Les prélèvements sur la Nature ne figurent qu'en coût d'enlèvement.*

Cette logique conduit à déconsidérer les investissements d'intérêt général tels que bâtiments scolaires, terrains de jeux, bibliothèques et à négliger les services produits par l'environnement et les coûts de sa dégradation. Les paradoxes mis en évidence par M. de Fontenelle et d'autres "pionniers" dans le monde entier ont permis une vaste prise de conscience des préjugés statistiques liés aux systèmes d'information macro-économiques traditionnels. Ils ont donné lieu à deux principaux types d'initiatives qui permettent de mieux incorporer la dimension "environnement" dans les politiques publiques :

- (i) le développement de systèmes de comptabilité nationale élargis afin d'incorporer les considérations sociales et environnementales ;
- (ii) l'élaboration d'indicateurs d'environnement et, plus récemment, de durabilité.

En accord avec les objectifs du programme STD3 - CT94-0310, la présente étude se concentre sur les indicateurs d'environnement. Néanmoins, compte tenu du rôle d'étape intermédiaire que ces indicateurs peuvent être appelés à jouer dans la mise en place progressive d'un système élargi de comptabilité patrimoniale (J.P. Brard, 1995), et de l'importance des méthodologies développées par la comptabilité de l'environnement pour la constitution d'indicateurs de développement durable, ce document présente brièvement en annexe III les principales approches suivies par la comptabilité de l'environnement.

1.2.2 Les principales initiatives pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement et de développement durable

Dès le début des années 70, de nombreux travaux furent menés pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement en réponse à une très forte prise de conscience des populations en Europe et en Amérique du Nord (Harvard University, 1996). Un grand nombre de ces travaux a été rassemblé en 1978 par Wayne Ott dans un ouvrage intitulé "*Environmental Indices*", qui recense les principaux indices de qualité de l'eau et de l'air et décrit plusieurs techniques d'agrégation.

Après l'étude de Ott, un désintérêt assez surprenant en matière d'indicateurs d'environnement semble s'être installé et très peu de recherches ont été publiées sur ce sujet pendant près d'une décennie (Harvard University, 1996). Ce n'est qu'à la fin des années 80 que le gouvernement du Canada relança les recherches dans cette direction (Bakkes and al., 1994). En 1987, le gouvernement des Pays-Bas débuta des travaux similaires. A cette même période, lors d'un sommet économique du G-7 à Paris, les sept pays les plus industrialisés demandèrent à l'OCDE de développer des indicateurs d'environnement.

La prise de conscience des interactions entre l'environnement et le développement atteint un nouveau sommet lors de la Conférence de Rio. Les chapitres 8 et 40 de l'Agenda 21 recommandent les indicateurs d'environnement comme instruments privilégiés pour incorporer l'environnement dans les processus décisionnels.

Après la CNUED, les initiatives pour développer des indicateurs d'environnement ou, de manière plus ambitieuse, des indicateurs de durabilité, se multiplièrent. Le tableau 5 développé par Bakkes *et al.* (1994) recense les efforts menés par huit gouvernements et organisations multilatérales différents. Comme indiqué au tableau 5, une très grande diversité d'approches existe. Cette diversité provient en partie du grand nombre de situations et d'objectifs auxquels ces indicateurs peuvent être appelés à répondre.

Tableau 5 - Analyse de plusieurs séries d'indicateurs d'environnement

Travaux et année	Nombre d'indicateurs	Type d'indicateurs	Unité spatiale	Unité temporelle
OECD (1991)	25	Expert	Nationale	Annuelle, au mieux
UNECE (1985)	25 (9 catégories)	Expert	Nationale	Peu claire
UNEP (1984)	70 (15 catégories)	Expert	Nationale	Peu claire
Pays-Bas (1984)	15	Expert	Nationale	Annuelle, au mieux
Canada (1991)	43 (18 catégories)	Expert	Nationale	Annuelle
Danemark (1991)	25 (4 catégories)	Expert	Nationale	Annuelle
IUCN (1991)	65 (5 catégories)	Expert	Peu claire	Peu claire
Norvège (1992)	34 (9 catégories)	Expert	Variée	Annuelle, au mieux

Sources: OECD, 1991 a; UNECE, 1985; UNEP, 1984; Vos et al 1986 (Dutch); Environment Canada, 1991; Danish Miljoministeriet 1992; IUCN, 1991; Norwegian Central Bureau of Statistics, 1992, cités par Bakkes et al. (1994).

Une étude bibliographique de la Banque Mondiale (J. Dumanski, S. Gameda, C. Pieri, 1998), ne recensa pas moins de 101 recherches s'attachant à définir des indicateurs de qualité des terres. Afin d'harmoniser ces différentes initiatives, le Département pour la Coordination des Politiques et le Développement Durable des Nations Unies (DCPDDNU) a initié en avril 1995 un "Programme de Travail sur les Indicateurs pour le Développement Durable". Ce programme de travail a trois objectifs principaux :

1. Développer un jeu d'indicateurs descriptifs pour évaluer les progrès vers un développement durable. Chaque pays pourra sélectionner les indicateurs qui correspondront le mieux à ses conditions de développement durable, leurs activités et priorités.
2. Évaluer et ajuster régulièrement le menu d'indicateurs de développement durable.
3. Poursuivre l'élaboration d'indicateurs de développement durable très agrégés pour faciliter la prise de décision.

En août 1996, le DCPDDNU a publié un premier éventail d'indicateurs de développement durable et des directions méthodologiques pour leur agrégation. Ce document a été remis à l'ensemble des pays membres pour les aider à incorporer le développement durable dans la prise de décision. La liste des indicateurs de développement durable proposés par le DCPDDNU est donnée en annexe IV. Cet éventail d'indicateurs de développement durable sera révisé de façon régulière sur la base des réactions des états membres.

1.2.3 Le rôle des indicateurs d'environnement dans la prise de décision

L'objectif des recherches menées en matière d'indicateurs d'environnement dans les années 90 diffère notablement de celui des recherches menées dans les années 70. Initialement conçus pour aider à l'identification des problèmes, les indicateurs d'environnement visent aujourd'hui principalement à aider à la prise de décision et à l'élaboration de stratégies.

Le chapitre 1.1.1 assimilait la prise de décision à un cycle au travers duquel les problèmes sont identifiés, des politiques sont élaborées, mises en œuvre, évaluées et ajustées afin d'améliorer la situation. Chaque famille d'indicateurs est appelée à jouer un rôle différent pour chacune de ces quatre étapes (M. Cheatle, 1995) :

Identification des problèmes : Au cours de cette étape, des indicateurs peuvent aider à représenter de manière synthétique la situation, à définir les problèmes, à identifier les points qui doivent être résolus en premier, à sensibiliser les décideurs et le public en général. Ces indicateurs appelés "descriptifs" sont le plus souvent simples, composés d'un seul paramètre. Le nombre de coliformes fécaux, par exemple, est généralement utilisé comme un indicateur simple pour évaluer la pollution organique des eaux.

Élaboration des politiques : Au cours de cette étape, les indicateurs peuvent aider à formuler des politiques et des stratégies pour résoudre les problèmes identifiés lors de la première phase. Une série d'indicateurs descriptifs simples peut rarement fournir toute l'information nécessaire à une prise de décision optimale. Les problèmes ont souvent des causes complexes et plusieurs alternatives sont généralement envisageables pour les résoudre.

Il est souvent nécessaire d'avoir recours à des modèles d'analyses spatiales, à des systèmes d'analyse multicritère ou autres instruments d'étude analytique pour aider à la prise de décision. Les indicateurs associés à ces systèmes d'analyse sont fortement agrégés pour pouvoir présenter l'ensemble des informations traitées de manière directement accessible aux décideurs. Ces indicateurs très agrégés ou indices sont particulièrement utiles pour une plus large participation des différents groupes concernés à la prise de décision. Le degré d'agrégation de ces indicateurs dépendra de la nature des utilisateurs finaux.

Mise en œuvre des politiques : Les indicateurs peuvent être utiles comme instruments normatifs pour suivre les progrès des politiques par rapport à des objectifs quantitatifs pré-établis. Ces indicateurs doivent être descriptifs et très agrégés.

Évaluation des politiques : Cette étape a pour objet d'évaluer l'efficacité des politiques afin de pouvoir les ajuster. Des indicateurs de performances sont très utiles à ce stade. Ils doivent normalement pouvoir comparer les résultats avec les objectifs initialement fixés. De même que pour la mise en œuvre des politiques, ces indicateurs peuvent être soit descriptifs soit très agrégés.

Les indicateurs sont constitués à partir d'une sélection de données plus vastes en fonction d'un objectif. L'élaboration d'un indicateur répondra donc à des critères différents de ceux qui sont mis en œuvre pour le développement de statistiques simples. Bien que les indicateurs soient souvent présentés d'une manière numérique ou graphique, ils diffèrent donc des autres informations statistiques dans le sens qu'ils sont partie intégrante d'une chaîne de décision. Un indicateur conçu pour un objectif donné se révélera totalement inadéquat pour un autre objectif. Une fois adoptés, les indicateurs guident l'acquisition et la présentation des données, rendant ces tâches plus économiques et permettant une meilleure utilisation de l'information.

1.2.4 Classification des indicateurs

Cette rapide étude des principales initiatives menées en matière de formulation d'indicateurs d'environnement et, plus récemment, d'indicateurs de durabilité, montre que ces termes englobent des instruments d'une nature et d'une complexité très variable. Il sera donc utile pour la suite de notre étude d'adopter un système de classification. Le PNUE (1994) propose une classification des indicateurs d'environnement selon trois critères: (i) l'objectif; (ii) le sujet; et (iii) la position dans la chaîne de causalité.

a. Classification par objectif : Comme discuté ci-dessus, les indicateurs peuvent être classés selon qu'ils ont pour objectif, dans la chaîne de décision, d'identifier un problème ou d'aider à la définition de politiques, à leur suivi ou à leur évaluation.

b. Classification selon le sujet : Les indicateurs sont classés selon les sujets qu'ils décrivent. Ils peuvent soit décrire des compartiments de l'environnement, tel que l'eau et l'air, ou des thèmes comme l'eutrophisation et le déboisement.

c. Classification en fonction de la place dans la chaîne de causalité : Les indicateurs sont classés en fonction de la place qu'ils occupent dans la chaîne de causalité, selon qu'ils décrivent la pression directe ou indirecte sur l'environnement (pollution, déboisement, croissance économique et démographique, etc.), l'état de l'environnement (érosion des sols, pollution de l'eau, etc.) ou la réponse

de la société aux problèmes d'environnement (programme de conservation des sols et de l'eau, planning familial, etc.). Cette classification suit le cadre conceptuel STRESS introduit par Friend et Rapport.

1.2.5 Elaboration et présentation des indicateurs d'environnement

Quatre grandes approches semblent possibles pour l'élaboration et la présentation d'indicateurs d'environnement : (i) indicateurs à un seul paramètre ; (ii) profils de qualité d'environnement à partir de plusieurs indicateurs à un paramètre ; (iii) indicateurs composites numériques ; et (iv) indicateurs composites graphiques.

1.2.5.1 Indicateur à un seul paramètre

Les indicateurs simples à un paramètre comme la demande biologique en oxygène d'un cours d'eau sont en général aisément mesurables. Du fait de l'absence d'agrégation ou autre traitement statistique, ils peuvent aussi faire aisément l'objet d'un consensus international quant à leur validité pour représenter un processus environnemental.

L'inconvénient principal des indicateurs simples est qu'ils nécessitent bien souvent une analyse préalable pour leur interprétation. En ce sens, ils sont d'une utilité réduite pour un public de décideurs politiques. De nombreux programmes de suivi de l'environnement se sont heurtés à cet écueil et n'ont jamais pu être en mesure d'influencer les prises de décision.


1.2.5.2 Profils de qualité de l'environnement

Les profils de qualité de l'environnement constituent un premier niveau d'aide à l'analyse de l'information en présentant ensemble plusieurs indicateurs simples de manière logique. Ils ont été définis comme "*un nombre d'indicateurs présentés en même temps afin de représenter les conditions de l'environnement (mais non agrégés ensembles)...*" (Ott, 1978). La figure 8 reproduit un modèle de profil de qualité de l'environnement publié par Ott (1978).


À la différence d'un indice, l'agrégation est conduite par l'utilisateur et non par une formule mathématique.

Figure 8 : Profil de qualité de l'environnement pour la région 10 de l'EPA en 1976


Composant	Indicateur	Etat	Tendance
Eau	Longueur de rivières dont l'eau est en dessous des normes de pollution		En amélioration
	Degré de violation des normes		En amélioration
Air	Nombre de jours de violation des normes		En amélioration
	Degré de pollution durant les jours de violation des normes		En amélioration
Radiation	Degré d'exposition		Pas de changement
Insecticides	Concentration dans la nourriture, l'eau et l'air		En amélioration
Déchets solides	Pourcentage de la population desservie par des décharges contrôlées		En amélioration
Bruit	Nombre de personnes exposées à un niveau de bruit inacceptable		Se détériorant



Conditions satisfaisantes



Secteur inquiétant, action nécessaire



Problème sérieux

Source : Ott, 1978.

La Commission Suédoise pour la Comptabilité de l'Environnement poursuit actuellement des travaux pour mettre au point des profils associant à la fois des indicateurs simples et des indicateurs composites (Bakkes *et al.*, 1994). Les détracteurs des profils soulignent qu'ils exigent, au même titre que les indicateurs simples, une connaissance relativement approfondie de la part des utilisateurs pour être vraiment utiles comme aide à la décision.

1.2.5.3 Indices numériques (indicateurs composites)

Selon Ott (1978), un indice environnemental est une fonction mathématique constituée "de deux variables ou plus". L'avantage de l'agrégation de plusieurs indicateurs simples en un indice est de pouvoir rendre immédiatement accessible aux utilisateurs un très grand nombre de données spécialisées. Un simple indice de pollution atmosphérique compréhensible par tous peut permettre, en quantifiant et simplifiant des mécanismes chimiques et physiques complexes, une sensibilisation du public et des décideurs et promouvoir l'élaboration de politiques de prévention. Le tableau 6 reproduit la liste d'indicateurs d'environnement à un seul ou plusieurs paramètres proposée par l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (1997)³.

Le principal problème associé à l'élaboration d'un indice est la validité des hypothèses retenues pour la sélection et la pondération des différents paramètres qui le constituent. Comme souligné par Bakkes *et al.* (1994), l'obtention d'un consensus sur les hypothèses retenues pour l'élaboration d'un indice est indispensable. Ce point, crucial pour la suite de notre étude, est clairement mis en évidence par le tableau 7 développé par W. Ott en 1978. Le tableau 7 représente les différentes combinaisons d'indicateurs retenues par six auteurs aux Etats-Unis pour l'élaboration d'un même indice de qualité globale des eaux.

³ Ce tableau répertorie les indicateurs du corps central proposé par le Groupe de l'OCDE sur l'état de l'environnement. Il comprend des indicateurs « idéaux » (designés par un double astérisque), des indicateurs complémentaires qui nuancent le message véhiculé par les indicateurs « idéaux », et des indicateurs de remplacement quand l'indicateur principal n'est pas mesurable actuellement.

Tableau 6 - Récapitulatif des indicateurs de l'OCDE par thème d'environnement

THEMES	PRESSIONS	ÉTAT	REPONSES
	Indicateurs des pressions sur l'environnement	Indicateurs des conditions environnementales	Indicateurs des réponses de la société
Changement climatique	- Indice des émissions de gaz à effet de serre** - Émissions de CO ²	-Concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre** -Température globale moyenne	- Rendement énergétique** - Intensité énergétique - Instruments économiques et fiscaux
Appauvrissement de la couche d'ozone	- Indice de la consommation apparente de substances appauvrissant la couche d'ozone** - Consommation apparente de CFC et d'halons	-Concentrations atmosphériques de substances appauvrissant la couche d'ozone** - Rayonnement UV-B au sol	- Taux de récupération des CFC**
Eutrophisation	- Émissions de N et P dans l'eau et le sol (bilan nutritif)** - N provenant de l'application d'engrais et de l'élevage	- DBO/OD, concentration de N et P dans les eaux intérieures et les eaux marines**	- % de la population raccordée à une station d'épuration biologique et/ou chimique des eaux usées** - % de la population raccordée à une station d'épuration - Redevances pour le traitement des eaux usées - Part de marché des détergents sans phosphates
Acidification	- Indice des substances acidifiantes** - Émissions de NOx et de SOx	- Dépassement des charges critiques de pH dans l'eau et les sols** - Concentration dans les précipitations acides	- % du parc automobile équipé de pots catalytiques** - Capacité des dispositifs de réduction des NOx et des Sox installés sur des sources fixes
Contamination toxique	- Émissions de métaux lourds** - Émissions de composés organiques - Consommation d'insecticides	- Concentration de métaux lourds et de composés organiques dans les milieux et les espèces vivantes** - Concentration de métaux lourds dans les rivières	- Changement de teneur en substances toxiques des produits et des processus de production** - Part de marché de l'essence sans plomb
Qualité de l'environnement urbain	- Émissions atmosphériques urbaines : NOx, SOx, VOC** - Densité de la circulation urbaine et nationale - Degré d'urbanisation	- Population exposée à la pollution de l'air et au bruit**	- Espaces verts** Instruments économiques, fiscaux et réglementaires - Dépenses de traitement de l'eau et de lutte contre le bruit
Biodiversité/Paysages	- Altération de l'habitat et conversion de terres les déviant de leur état naturel**	- Espèces menacées ou disparues par rapport à l'ensemble des espèces connues**	- Zones protégées en % du territoire et par type d'écosystème**
Déchets	- Production de déchets** municipaux, industriels, nucléaires et dangereux	Ne s'applique pas	- Minimisation des déchets** -Taux de recyclage - Instruments économiques et financiers
Ressources en eau	- Intensité d'utilisation des ressources en eau**	- Fréquence, durée et étendue des périodes de pénurie d'eau**	- Tarification de l'eau et redevances pour l'épuration des eaux usées**
Ressources forestières	-Réculte réelle/Capacité de production**	- Superficie/Volume et structure des forêts**	- Gestion et protection des forêts**
Ressources halieutiques	- Prises de poissons**	- Taille des stocks de reproduction**	- Réglementations des stocks (quotas)
Dégradation des sols (désertification et érosion)	-Risques d'érosion: utilisation potentielle et réelle du sol pour l'agriculture** - Changement dans l'utilisation des sols	- Taux de perte de la couche arable**	- Zones réhabilitées**
Indicateurs généraux, non liés à un thème particulier	-Croissance et densité démographiques** - Croissance du PIB** - Consommation finale privée** - Production industrielle** - Structure de l'approvisionnement en énergie** - Volumes de la circulation routière** - Parc de véhicules routiers** - Production agricole**	Ne s'applique pas	- Dépenses en matière d'environnement** - Dépenses de lutte contre la pollution - Opinion publique**

Source : OCED (1997).

Tableau 7 - Paramètres biologiques, chimiques et physiques retenus par différents auteurs pour l'élaboration d'un indice de la qualité de l'eau aux Etats-Unis

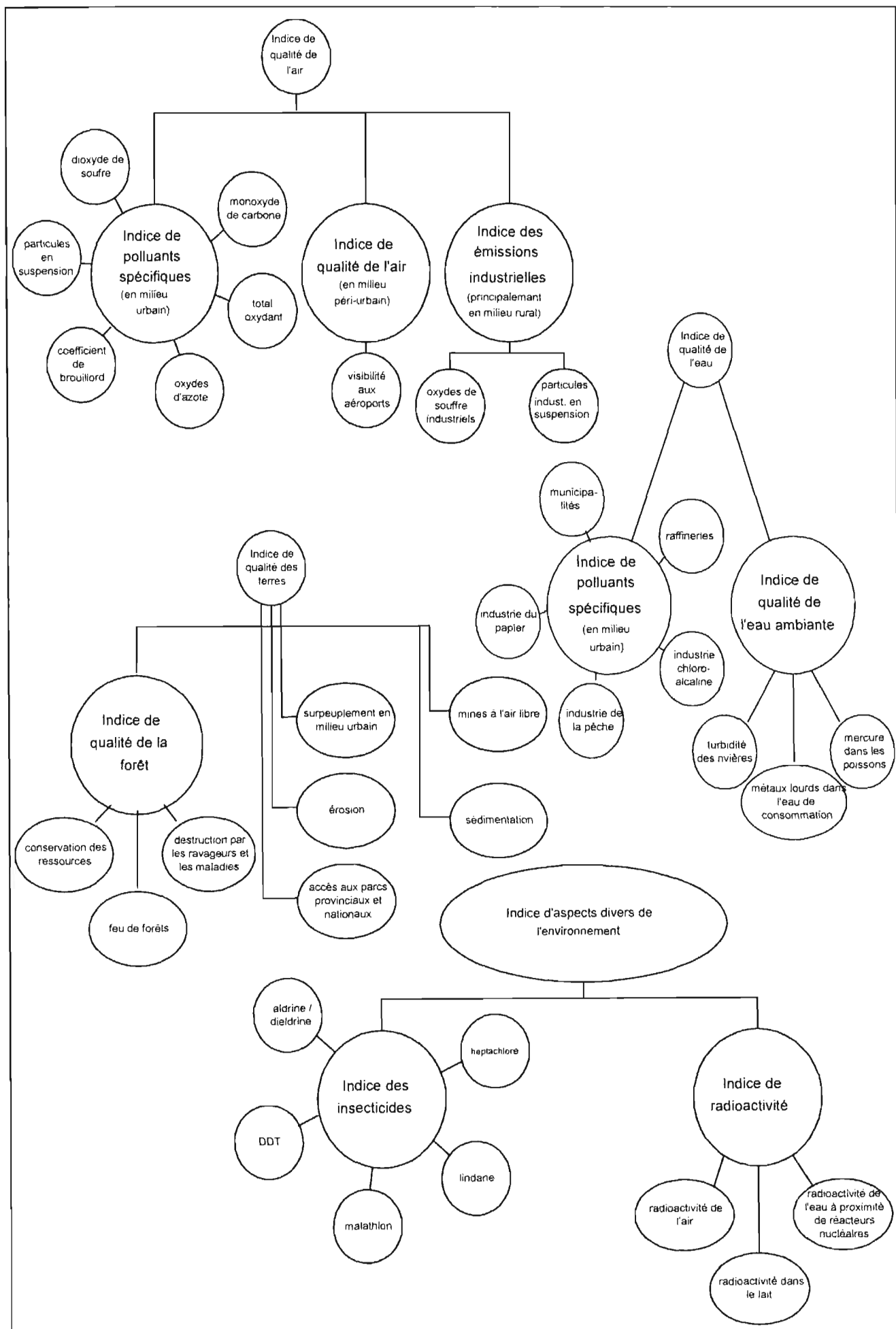
Paramètres	Horton	Brown <i>et al.</i>	Prati <i>et al.</i>	McDuffie <i>et al.</i>	Dinius	Dee <i>et al.</i>
Paramètres chimiques						
O ₂ dissous						
DBO ₅	X	X	X	X	X	X
DCO		X	X	X	X	X
Alcalinité			X	X		
Dureté	X				X	
Fe					X	
Mn			X			
NH ₄			X			
NO ₂			X			
NO ₃						
Autres N		X	X			
Phosphates				X		X
Autres P		X		X		
Fluorides						X
Chlorides						
Sulfates	X		X		X	
Huiles et graisses						
Phénols						
ABS						
SEC			X			
Autres	X		X			
Paramètres physiques						
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20° C			X	X		X
Température	X			X	X	
PH	X	X		X	X	X
MES	X	X	X		X	X
MD		X	X			
Turbidité						
Couleur		X				
Autre					X	
Paramètres biologiques						
Coliformes fécaux						X
Coliformes totaux	X	X			X	X
Autres	X			X	X	

Horton : *Quality Index*; Brown *et al.* : *Water Quality Index*; Prati *et al.* : *Implicit Index of Pollution*; McDuffie and Hancy : *River Pollution Index*; Dinius : *Social Accounting System*; Dee *et al.* : *Environmental Evaluation System*, cités par Ott, 1978.

La très grande diversité des combinaisons retenues illustre les incertitudes et la subjectivité associées à tous efforts d'élaboration d'indicateurs composites.

De même, l'indice de qualité de l'environnement (IQE) développé par Inhaber et une équipe de Canada Environnement au début des années 70 illustre les problèmes inhérents à toute pondération de différentes dimensions de l'environnement au sein d'un même indice. L'IQE est élaboré à partir de l'agrégation de quatre sous-indices représentant les grands compartiments de l'environnement identifié par Inhaber (1976) : (i) qualité de l'air ; (ii) qualité de l'eau ; (iii) qualité des terres ; et (iv) divers (essentiellement les insecticides et les déchets radioactifs). La figure 9 représente les différents sous-indices constituant l'IQE. Nous reproduisons ici les équations d'agrégation du EQI et du sous-indice de la qualité de l'air et de l'EQI, comme suit :

Figure 9 : Représentation graphique de l'indice de qualité de l'environnement (IQE) de Inhaber



Indice de qualité de l'air

$$I_{air} = \sqrt{0.2I_{SO_2}^2 + 0.1I_{SPM}^2 + 0.1I_{COH}^2 + 0.2I_{CO}^2 + 0.2I_{O_3}^2 + 0.2I_{NO_x}^2}$$

Où

I_{SO_2} = Indicateur de dioxyde de soufre.

I_{SPM} = Indicateur de particules totales en suspension.

I_{COH} = Indicateur de coefficient de brouillard.

I_{CO} = Indicateur de monoxyde de carbone.

I_{NO_x} = Indicateur d'oxydes d'azote.

Indice de qualité générale de l'environnement

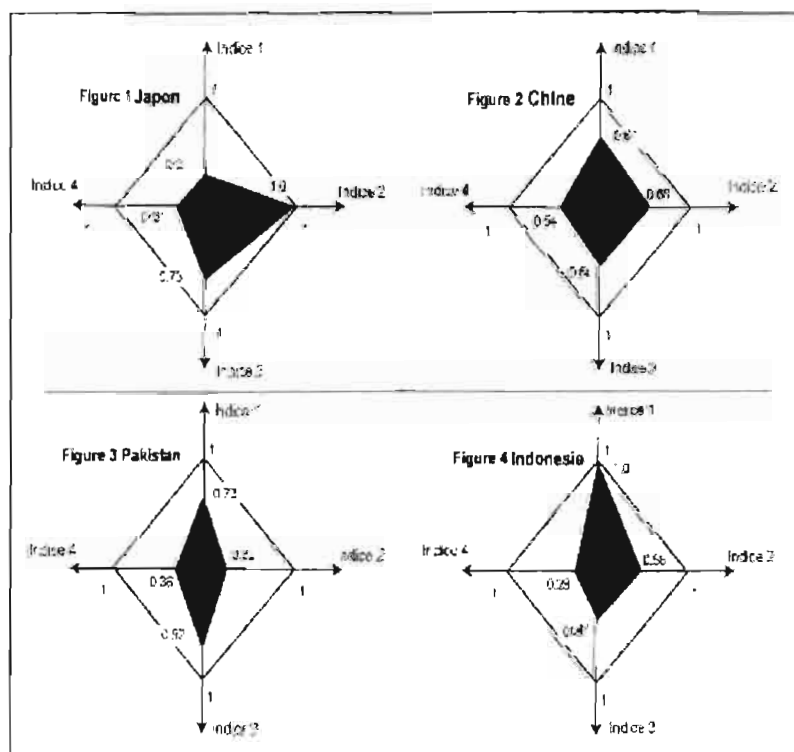
$$I_{EQI} = \sqrt{0.3I_{AIR}^2 + 0.3I_{EAU}^2 + 0.3I_{TERRE}^2 + 0.1I_{DIVERS}^2}$$

L'analyse de ces équations fait clairement apparaître à quel point la sélection et l'importance donnée aux différents indicateurs d'environnement dans la constitution d'un indice général d'environnement influenceront le résultat final.

1.2.5.4 Indices graphiques

Une seconde façon d'agréger des indicateurs simples ou des indices sectoriels consiste à les visualiser. La figure 10 reproduit une autre visualisation graphique possible appelée "les Diamants de l'environnement". Cette approche a été développée par l'Université de Harvard (1996) à la demande de la Banque Asiatique de Développement. Elle s'inspire des "Diamants du développement" introduits par la Banque mondiale dans son "Rapport sur les indicateurs sociaux du développement" (1994). À partir d'une analyse en composantes principales⁴ de 33 variables environnementales, l'Université de Harvard a sélectionné les quatre grands compartiments suivants pour représenter la qualité de l'environnement :

Figure 10 : Diamants de l'environnement



⁴L'analyse en composantes principales est une technique de réduction mathématique du nombre total de données nécessaires pour représenter un phénomène multi-dimensionnel. Elle permet d'identifier le degré de corrélation entre différentes données et sélectionner un nombre limité de données pouvant représenter plusieurs dimensions fortement corrélées d'un même phénomène.

1. la qualité de l'air en milieu urbain, définie par les pollutions sonores et la concentration en particules en suspension, en SO₂ et en plomb ;
2. la qualité des eaux, comme fonction du taux de matières solides en suspension, de la demande biologique et chimique en oxygène, et du comptage bactériologique (*E.Coli*) ;
3. la qualité des sols, définie par le taux d'érosion et la pollution des sols provenant de l'emploi de composés agrochimiques et de la décharge de déchets solides et toxiques ;
4. la dégradation de l'écosystème terrestre mesurée par le pourcentage de couvert forestier, le taux de déboisement et le pourcentage d'espèces végétales et animales en voie d'extinction.

L'état de ces quatre grands compartiments de l'environnement (air, eau, sol et écosystème terrestre) est représenté sur un système d'axes cartésiens. Chaque indice est calculé après comparaison des conditions présentes du compartiment avec les normes environnementales acceptées internationalement ou localement. La note varie de 0 à 1. Les diamants sont conçus de façon à correspondre à un *a priori* intuitif qui nous fait considérer que ce qui est large est bon. Plus le diamant est large, plus les conditions sont bonnes. Ainsi, le volume réduit du diamant pour le Pakistan illustre la gravité des phénomènes d'érosion des sols et de contamination de l'eau dans ce pays.

L'objectif principal de cette approche est de faciliter une comparaison entre les quatre grands compartiments de l'environnement et d'éviter les problèmes inhérents à la pondération de différents aspects de qualité de l'environnement au sein d'un même indice.

1.2.6 Modèles d'indices de fonction de l'environnement

Deux principales méthodologies peuvent être considérées pour élaborer des indicateurs composites de l'environnement : une agrégation par compartiment de l'environnement (ex: air, eau, sol, forêts); ou par fonction de l'environnement (ex: provision de ressources naturelles, maintien de la vie, assimilation des déchets, etc.). Des indicateurs composites par compartiment permettent une identification plus précise des problèmes environnementaux et sont en général plus simples à mettre en œuvre. Par contre, ils seront aussi d'une plus grande complexité d'interprétation.

En effet, les grands compartiments de l'environnement évoluent rarement dans la même direction et l'analyse de l'impact de l'évolution de l'un par rapport à l'autre exige une connaissance relativement approfondie des mécanismes environnementaux. L'objectif des indices composites par fonction est de refléter de manière simple l'ensemble de ces interactions entre les grands compartiments de l'environnement et leurs impacts sur les fonctions vitales de l'environnement.

Les indices de fonction de l'environnement seront donc d'une compréhension plus aisée par les décideurs locaux. Ils exigeront par contre des compromis substantiels en matière de pondération des paramètres de base, et demanderont une collecte et une analyse beaucoup plus importante de l'information.

L'IQE d'Inhaber et les Diamants de l'environnement de Harvard précédemment décrits sont tous deux agrégés par compartiment de l'environnement. En conclusion de cette présentation des différents indicateurs possible d'environnement, nous décrivons ici brièvement deux méthodologies développées par le World Resource Institute (WRI) et l'International Union for Conservation of Nature (IUCN), pour l'élaboration d'indices de fonction de l'environnement.

1.2.6.1 Le modèle à quatre indices du WRI

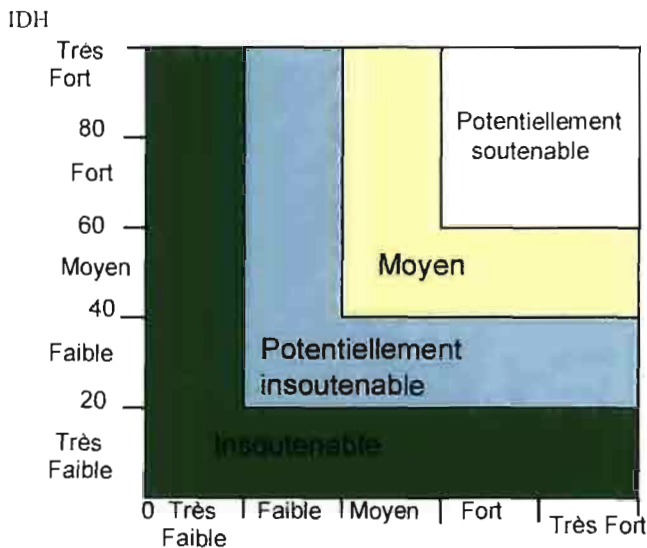
Ce modèle, introduit par le WRI, se propose de simplifier et de quantifier les quatre grands types d'interactions existants entre la population et l'environnement: (i) prélèvement des matériaux; (ii) assimilation des déchets domestiques et industriels; (iii) production de services vitaux; et (iv) impact du milieu sur la santé des populations.

Afin de représenter ces quatre types d'interactions, WRI recommande l'élaboration de quatre indices très agrégés : (i) un indice de prélèvement des ressources naturelles ; (ii) un indice de pollution ; (iii) un indice de dégradation de l'écosystème ; et (iv) un indice d'impact de l'environnement sur la santé des populations. Le tableau 8 présente plusieurs indicateurs possibles pour constituer ces quatre indices (WRI, 1995).

1.2.6.2 Le modèle du baromètre de durabilité proposé par l'IUCN

Le programme IUCN/IDRC pour le suivi et l'évaluation des progrès vers un développement durable (1995) propose d'agréger plusieurs indicateurs d'environnement et d'éléments socio-économiques afin de représenter en un indice graphique unique, le "baromètre de durabilité", l'ensemble des interactions entre la population et l'environnement, et la durabilité de ces interactions. La figure 11 reproduit le baromètre de durabilité.

Figure 11 : Baromètre de durabilité (Prescott-Allen 1990)



L'abscisse de ce graphique est calculée à partir de l'agrégation de quatre indices thématiques d'environnement très proches des indices proposés par le WRI : (i) l'indice des espaces naturels qui mesure l'impact de la société sur l'écosystème à partir du pourcentage des espaces naturels par rapport aux espaces construits, cultivés, et aménagés ; (ii) l'indice de qualité d'écosystème qui mesure la qualité générale de l'air, de l'eau et du sol, et la capacité d'assimilation des déchets de l'écosystème ; (iii) l'indice de biodiversité qui mesure la diversité biologique ; et (iv) l'indice d'utilisation des ressources qui mesure l'utilisation des ressources renouvelables et non-renouvelables.

L'ordonnée de ce graphique est calculée à partir de l'Indice de Développement Humain (IDH) élaboré par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD, 1990 et années suivantes). Cet Indice agrège le degré d'alphabétisation des populations, leur espérance de vie et le produit national brut. L'IDH a pour objet de calculer les opportunités offertes à chaque individu par un milieu donné pour développer ses capacités.

L'IUCN note que le choix des indicateurs pour constituer les différents indices d'environnement dépendra en premier lieu des conditions spécifiques à chaque pays ou région.

Tableau 8 - Indicateurs de fonction de l'environnement

Thèmes	Pressions	État	Réponse
I. Indicateurs de prélèvement des ressources 1. Agriculture a. Qualité des terres b. Autres 2. Forêts 3. Ressources halieutiques 4. Eau 5. Ressources du sous-sol a. Energie fossile b. Métaux et minéraux	Valeur ajoutée/Production brute Changements d'utilisation des sols Contaminants, consommation de poisson Intensité des prélèvements Taux d'extraction Taux d'extraction Taux d'extraction	% de la richesse dérivée des terres arables, classification climatique et contraintes d'exploitation Superficie, distribut., vol. et valeur des forêts Taille des stocks de reproduction Accessibilité à la population % de la richesse dérivée des ressources du sous-sol Réserves confirmées	Échanges commerciaux ruraux/urbains Récolte/Production, utilisateurs principaux, taux de recyclage Application des accords internationaux (quotas) Efficacité de l'utilisation de l'eau Équilibre des ressources/ Produit national net, inversion des subventions énergétiques, utilisateurs principaux, taux de recyclage
II. Indicateurs d'assimilation des déchets 1. Changement de climat a. Gaz à effet de serre b. Ozone stratosphérique 2. Acidification 3. Eutrophisation 4. Toxification	Émissions de CO ₂ Consommation apparente de CFC Émissions de SO _x et de NO _x Utilisation de phosphates (P) et de nitrates (N) Production de déchets toxiques	Concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et de CFC pH et concentrat. en SO _x et NO _x des précipitations DBO, concentrat. en P et N des rivières Concentrat. en plomb, cadmium, etc. des rivières	Intensité énergétique du produit national net Application des protocoles/Conv. Internat Dépenses de lutte contre la pollution % pop. Raccordée à des stations d'épuration % des carburants sans plomb
III. Indicateurs de maintien de la vie 1. Biodiversité 2. Océans 3. Zones spéciales (zones humides, etc.)	Changements d'occupation des terres Espèces menacées et disparues par rapport à l'ensemble des espèces connues	Habitat	Écosystèmes protégés par rapport à l'ensemble des écosystèmes menacés
IV. Indicateurs d'impact sur l'homme Santé Qualité de l'eau Qualité de l'air Risque liés au travail, etc. Sécurité alimentaire et qualité Habitation Déchets Catastrophes naturelles	Morbidité (jrs/pers.) Demande énergétique Densité de population Production de déchets Industriels et municipaux	Espérance de vie à la naissance Oxygène dissous, coliformes fécaux Concentration en particules, SO ₂ , etc. Accumulation à ce jour	% PNN alloué à la santé, vaccination, etc. Accès à des services d'eau potable % PNN alloué à l'habitation Dépenses de collecte et de traitement, taux de recyclage

World Bank cité par WRI-*Environmental indicators* (1995) - Traduit de l'anglais par Y. Glemarec.

1.2.7 Les principales contraintes pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement

1.2.7.1 Analyse des modifications apportées dans l'agrégation de l'IDH

L'intérêt pour le développement durable et les préoccupations du public face aux menaces qui pèsent sur l'environnement ont conduit les gouvernements et institutions internationales à réexaminer les moyens dont ils disposent pour estimer l'importance de ces menaces, surveiller l'état de l'environnement et évaluer la performance de leurs politiques d'environnement. Dans ce contexte, les indicateurs d'environnement apparaissent de plus en plus comme des outils indispensables pour promouvoir et mettre en œuvre des politiques de développement. Traduire ce besoin pour des indicateurs d'environnement en une réalité reste cependant une tâche ardue.

Comme rapidement abordé aux sections précédentes, tous les efforts de définition d'indices d'environnement se heurtent à trois principaux écueils :

- L'absence d'information détaillée sur certains compartiments de l'environnement comme la biodiversité ou la conservation des sols, et ce même dans les pays disposant d'un appareil statistique très développé ;
- Les incertitudes et la subjectivité associées à la sélection et à la pondération des indicateurs qui constitueront un indice d'environnement ;
- Notre connaissance limitée des capacités d'assimilation et de régénération du milieu et donc des seuils maximum tolérables de dégradation de l'environnement.

En conclusion de la première partie de cette étude, nous nous proposons d'illustrer l'impact de ces trois contraintes au travers de l'analyse des différentes modifications apportées à l'élaboration de l'Indice de Développement Humain (IDH) du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) depuis sa création en 1990.

La figure 12 représente les variations de classement IDH pour ces deux pays sous forme graphique. Le tableau 9 représente les sélections successives d'indicateurs pour l'élaboration du IDH et les variations correspondantes de classement IDH pour les Etats-Unis et la France au cours des dix dernières années. Les Etats-Unis et la France étaient respectivement classés dix-neuvième et huitième lors de la première publication de l'Indice de développement humain en 1990. La seconde édition du rapport en 1991 catapulta les Etats-Unis de la dix-neuvième à la septième position.

Figure 12 : Variations du classement IDH de la France et des Etats-Unis de 1990 à 1999

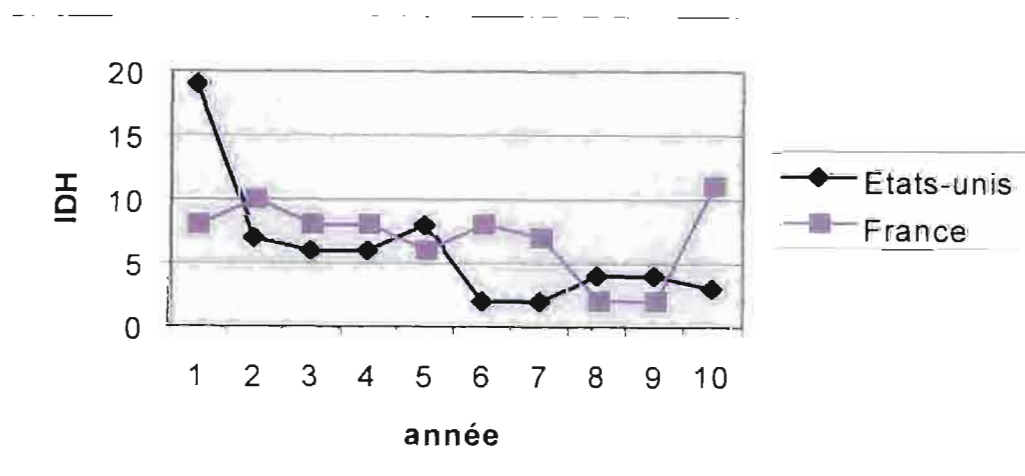


Tableau 9 - Modifications de la méthodologie de construction du IDH depuis sa création en 1990

Année	Indicateurs composites du IDH	Rang EU	Rang France
1990	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Revenus [log (ppp\$)]	19	8
1991	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Moyenne d'années de scolarisation Revenus [log (ppp\$) ajusté]	7	10
1992	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Moyenne d'années de scolarisation Revenus [log (ppp\$) ajusté]	6	8
1993	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Moyenne d'années de scolarisation Revenus [log (ppp\$) ajusté]	6	8
1994	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Moyenne d'années de scolarisation Revenus [log (ppp\$) ajusté]	8	6
1995	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Scolarisation combinée des premier, second et troisième cycles Revenus [log (ppp\$) ajusté]	2	8
1996	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Scolarisation combinée des premier, second et troisième cycles Revenus [log (ppp\$) ajusté]	2	7
1997	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Scolarisation combinée des premier, second et troisième cycles Revenus [log (ppp\$) ajusté]	4	2
1998	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Scolarisation combinée des premier, second et troisième cycles Revenus [log (ppp\$) ajusté]	4	2
1999	Espérance de vie à la naissance Taux d'alphabétisation Scolarisation combinée des premier, second et troisième cycles Revenus [$w(y) (\log y - \log y_{\min} / \log y_{\max} - \log y_{\min})$]	3	11

Deux facteurs expliquent cette spectaculaire amélioration du classement IDH des Etats-Unis. En 1990, le taux d'alphabétisation de ce pays était estimé à 96 %, le classant loin derrière la plupart des pays de l'OCDE. En 1991, ce taux d'alphabétisation était réévalué à 99 %, soit la moyenne de l'ensemble des pays industrialisés, sur la base de données statistiques plus complètes.

De plus, la composition de l'IDH était modifiée pour inclure un second indicateur d'éducation, *la moyenne d'année de scolarisation*. Les Etats-Unis ayant la plus forte moyenne d'année de scolarisation au monde (12.2 contre 9.4 pour la France par exemple), ils obtenaient donc la note maximale de 1 pour les indicateurs d'éducation.

En 1994, les Etats-Unis et la France permutaient de position. Bien que le choix des indicateurs n'ait pas varié, la façon de calculer la valeur de chacun d'entre eux était modifiée. Les quatre premières éditions de l'IDH étaient calculées à partir du rapport entre la valeur d'un pays donnée et les valeurs maximales et minimales atteintes par des pays (voir Agrégation de l'IDH, encadré 1).

En 1994, les maximums et minimums pour chaque indicateur simple n'étaient plus calculés à partir des meilleurs et plus mauvais résultats atteints par les pays, mais à partir de seuils théoriques. Ainsi, le nombre moyen d'années de scolarisation ne variait plus de 12.3 (Etats-Unis) à 0.1 (Burkina-Faso) mais de 15 à 0 ans. La note des Etats-Unis pour les indicateurs d'éducation diminuait donc de 1.00 à 0.83. Bien qu'il s'agisse toujours du meilleur résultat, il ne suffisait plus à compenser une espérance de vie relativement faible par rapport aux autres pays les plus riches de la planète.

En 1995, les Etats-Unis accédaient à la seconde place au classement IDH, la composition de l'indice du développement de l'éducation (IDE) ayant été de nouveau modifiée. L'indicateur d'éducation «moyenne d'années de scolarisation» était remplacé par le «taux de scolarisation agrégé des premier, second et troisième cycles». Avec un taux de 95 %, les Etats-unis obtenaient le second résultat le plus fort après le Canada.

En 1997, les Etats-unis redescendaient à la quatrième place alors que la France se hissait à la seconde, l'espérance de vie moyenne de sa population ayant été réévaluée de 77 à 78.7 ans. En 1999, les Etats-unis remontaient à la troisième place alors que la France chutait à la onzième du fait d'une modification dans le calcul du revenu donnant un poids plus important au PNB *per capita*.

Contrairement à ce que cette courte description pourrait donner à penser, les variations de classement IDH des Etats-Unis et de la France au cours de ces 10 dernières années ne proviennent pas d'un faible soin apporté à l'élaboration de l'indice ou à des pressions politiques exercées par ces deux membres du Conseil de sécurité pour augmenter leur classement respectif.

L'IDH a bénéficié de recherches exhaustives au cours de ces dernières années pour en augmenter la pertinence. Une fondation statistique unique a été établie pour la construction de l'IDH. L'évolution des Etats-unis et de la France démontre néanmoins à quel point de nouvelles statistiques, une modification du choix des indicateurs simples composant l'indice ou des seuils retenus pour calculer la valeur de ces indicateurs influenceront la valeur finale de l'indice et son intérêt pour la prise de décision.

1.2.7.2 La définition des seuils environnementaux.

La définition de seuils se révélera particulièrement difficile dans le domaine de l'environnement. Alors que nous avons acquis une compréhension assez fine des processus physiques de dégradation de l'environnement, nous savons encore très peu sur les seuils critiques à ne pas dépasser pour le maintien de la vie sur terre à un niveau de confort des populations et de développement technologique donné. Nous illustrerons ce point au travers d'une courte description des difficultés méthodologiques rencontrées pour estimer les seuils maxima tolérables d'érosion des sols et de déforestation.

Encadré 1 : Agrégation de l'Indicateur de développement humain (IDH)

Les équations d'agrégation de l'IDH ont considérablement varié au cours de ces dix dernières années. Nous reproduisons ici l'approche méthodologique de 1992.

L'IDH est un indicateur composite comportant trois éléments clés: la durée de vie, les connaissances et le revenu, qui sont combinés selon un processus à trois étapes pour calculer un indicateur de « manque » moyen. La durée de vie est mesurée d'après l'espérance de vie à la naissance, cet indicateur étant le seul qui ne soit pas ajusté. Les connaissances sont mesurées par deux variables de base ayant trait à l'éducation: l'alphabétisation des adultes et la moyenne d'années d'études. Le niveau d'instruction est quantifié en affectant une pondération de deux à l'alphabétisation et d'un tiers à la moyenne d'années d'études.

$$E = a_1 (\text{alphabétisation}) + a_2 (\text{années d'études})$$

$$a_1 = 2/3 \text{ et } a_2 = 1/3$$

S'agissant du revenu, on a retenu pour l'IDH une formule selon laquelle cette variable contribue à divers degrés au développement humain, de façon décroissante au-delà d'un certain seuil. C'est la formule d'Atkinson, formule connue et largement utilisée, que l'on applique pour calculer l'utilité du revenu :

$$W(y) = 1/(1-\epsilon) \cdot y^{1-\epsilon}$$

$W(y)$ est ici l'utilité du revenu (ou le bien-être dérivé du revenu) et le paramètre mesure l'importance du rendement décroissant. Il exprime l'élasticité de l'utilité marginale du revenu par rapport au revenu. Si $\epsilon = 0$, il n'y a pas de revenu décroissant. À mesure que la valeur de ϵ approche de 1, l'équation devient :

$$W(y) = \log y$$

La valeur de ϵ prise en compte dans l'IDH s'accroît progressivement à mesure que le revenu augmente, l'étendue du revenu étant divisé en multiple du seuil de pauvreté y^* . Pour tous les pays où $y < y^*$, c'est-à-dire les plus pauvres, la valeur de ϵ est fixée à 0. Si $ay^* < y < (a+1)y^*$, $\epsilon = a/(a+1)$. De la sorte, plus le revenu est élevé par rapport au seuil de pauvreté, plus les rendements décroissants se répercutent sur la contribution du revenu au développement humain.

L'IDH classe les pays les uns par rapport aux autres sur une période donnée. Les valeurs les plus élevées et les plus basses qui mesurent pour chaque variable le progrès à accomplir s'appliquent à une année donnée. En terme algébrique, X_1 étant l'espérance de vie, X_2 le niveau d'instruction et X_3 le revenu, la contribution de chaque variable à l'IDH pourra s'exprimer comme suit :

$$Z_{it} = [X_{it} - \min_{it}] / [\max X_{it} - \min X_{it}]$$

Alors que l'érosion des sols est considérée par l'ensemble de la communauté scientifique comme un indicateur clé de la dégradation des sols, il n'existe pas de consensus sur le seuil maximum tolérable pour évaluer la gravité de cette dégradation.

Le terme "érosion" provient du verbe latin "erodere" qui signifie ronger (Roose, 1996). Malgré la connotation négative donnée par le verbe "ronger", l'érosion est un phénomène naturel qui dénude les montagnes mais enrichi en même temps les vallées. En ce sens, il n'est pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais plutôt de la réduire à un seuil tolérable.

Ce seuil de tolérance à l'érosion a tout d'abord été défini comme la différence entre la vitesse d'usure du sol (morphogénèse) et sa vitesse d'épaississement par altération de la roche mère (pédogénèse). La perte en sol par érosion peut varier de 1 à 12 tonnes par hectare et par an suivant le climat, le type de roche et la profondeur du sol (Roose, 1996). En général, la productivité de la couche supérieure du sol, contenant de l'humus et riche en éléments fertilisants, est bien plus grande que celle des couches profondes. Cette couche supérieure est la première à subir l'érosion.

Afin de refléter l'érosion sélective des éléments fertilisants et des colloïdes du sol, le seuil de tolérance fut par la suite défini comme une érosion qui ne se traduit pas par une baisse substantielle de productivité du sol (Roose, 1996). Néanmoins, cette nouvelle définition présentait aussi un certain nombre de difficultés. Dans certains cas, comme celui des sols de loess profonds, une forte érosion n'entraînera qu'une faible perte de productivité. Par contre, elle pourra donner lieu à des coûts économiques hors site majeurs comme l'envasement des réservoirs ou la pollution des eaux.

Pour définir le seuil de tolérance des sols à l'érosion, Roose (1996) recommande de considérer au moins trois aspects : (i) la vitesse de réhabilitation du sol ; (ii) le maintien du niveau de productivité du sol pour des apports identiques en éléments fertilisants ; et (iii) le respect de l'environnement, notamment en matière de qualité des eaux, impact du ruissellement et sédimentation (Stocking 1978, Mannering 1981, rapporté par Roose, 1996).

Il ne sera guère plus aisé de définir un seuil maximum de déforestation. La déforestation conduit-elle inexorablement à une dégradation des sols et de l'environnement en milieu tropical? Les forêts tropicales couvrent moins de 7 % de la surface du globe mais abritent plus de la moitié de la biodiversité terrestre (E.O. Wilson, 1988).

Malgré leur richesse biologique extraordinaire, les forêts tropicales font partie des habitats les plus fragiles au monde. Elles se développent sur des déserts humides; deux tiers des forêts tropicales se trouvent sur des sols ferrallitiques et des podzols tropicaux très sableux (P. Brabant, communication personnelle). Ces derniers, parmi les moins naturellement fertiles, sont caractérisés par une très forte acidité et une pauvreté en minéraux utiles pour les plantes. La forêt se maintient néanmoins sur ces sols dans leur état naturel grâce à son action sur le cycle des bases, qui sont remontées en surface par les racines, et au stock d'humus.

Si les zones défrichées occupent de faibles superficies (moins de deux hectares par essart), la forêt se régénère rapidement et le déboisement permet en fait un enrichissement de la diversité du milieu par l'introduction d'espèces animales et végétales opportunistes (FAO, 1994). Si le déboisement s'étend par contre sur de plus larges étendues, la courte durée de germination de nombreuses espèces tropicales limitera leur capacité à se disperser sur des sols dénudés à la recherche de sites favorables à leur croissance. Le suivi de sites déboisés indique qu'une régénération complète de la forêt tropicale peut dans ce cas nécessiter plusieurs siècles (E.O. Wilson, 1988). L'impact de toute déforestation dépendra donc du mode d'occupation et d'utilisation des sols, du substrat pédologique et de la superficie déforestée.

1.2.7.3 Les principaux clivages de la pensée environnementale

Compte tenu de la complexité des phénomènes observés et de leur étendue dans le temps, les seuils maxima de dégradation de l'environnement que nous choisirons en diront souvent plus sur nos convictions que sur les écosystèmes qu'ils sont sensés décrire. En l'absence de "révélation spontanée" de seuils naturels, les valeurs que nous retiendrons dépendront souvent de notre notion du progrès humain et de nos valeurs éthiques et sociales.

Le *World Business Council for Sustainable Development* a fortement souligné dans une étude des futurs possibles (1997) l'importance des « mythes » qui régissent notre façon de penser sur notre perception des problèmes environnementaux, et sur les réponses que nous sommes susceptibles d'y apporter. Le tableau 10 représente les quatre grands types de mythes définis par le WCSD.

Notre monde contemporain est dominé par le mythe économique. De nombreux essais sur l'environnement et le développement durable peuvent se lire comme une révolte contre la prédominance du mythe économique et ses limites comme seul vecteur du progrès humain. La critique environnementale apparaît alors comme une extension des travaux d'économiste politiques, tels que Robert Malthus, Karl Marx ou Dennis Meadows du Club de Rome, sur les limites de la croissance. Ainsi, Jean-Marie Harribey (1998) propose la définition suivante de la crise de développement :

«La crise du développement peut donc être définie comme la rupture entre un processus d'accumulation et l'ensemble des processus de régulation des rapports sociaux et des rapports entre l'homme et la nature instrumentalisée. Elle englobe et dépasse une crise du capitalisme. Cette dernière est une interruption de la valorisation du capital liée à la difficulté de produire et de réaliser de la plus-value mais sans que soit remise en cause l'adhésion aux valeurs du progrès matériel».

Tableau 10 - Principaux mythes régissant la perception de l'environnement

	Héros	Religieux	Démocratique/ scientifique	Économique
Idéal	Excellence	Bonté	Vérité	Croissance
Comportement	Compétition	Obéissance	Raison	Optimisation des bénéfices
Acteurs	Héros	Saints/ Prophètes	Philosophes/ Scientifiques	Consommateurs/ commerciaux
Communication	Contes	Écritures Saintes/prières	Exposés logiques /mathématiques	Images/ nombres

A l'autre extrémité du débat environnemental, l'analyse suivante pouvait se lire dans *The Economist* (1998) :
"The notion of a growing number of people fighting over a fixed resource pie is a Malthusian bosh, as this newspaper has argued in the past. Human ingenuity, energised by sensible policies, creates resources faster than people use them ; people learn to substitute sand (in the form of microchips) for sweat, and fuel cells for petrol engines".

Rappelant que l'augmentation de la productivité agricole a permis de s'affranchir des limites en terres arables et que la multiplication des besoins et des marchés a permis d'éviter une interruption de la valorisation du capital, cette seconde approche fait confiance au développement des technologies de substitution pour parer à une pénurie en matières premières. Elle s'appuie aussi sur la croissance économique et le progrès technologique pour lutter contre la pauvreté et résoudre les problèmes environnementaux qui y sont associés comme la déforestation et la dégradation des sols.

Bien que reconnaissant l'importance de la préservation de l'environnement, de nombreuses nations s'opposent aussi à l'application de normes internationales plus strictes pour l'environnement. Elles craignent notamment que ces initiatives n'affectent négativement leur croissance économique et la résolution de problèmes sociaux jugés plus pressants.

Il est clair qu'une évaluation de l'ampleur et de l'impact des phénomènes de dégradation de l'environnement variera considérablement selon que l'on sera le tenant d'un modèle de développement basé sur le progrès matériel ou d'une décélération de la croissance économique pour un développement durable à visage humain.

Un second clivage majeur peut être discerné entre une conception déterministe et évolutionniste de l'environnement. La première repose sur une vision de l'univers en termes de répétitivité, d'immuabilité et de réversibilité. À chaque milieu correspondra une capacité biotique maximale pour l'espèce humaine et un type de gestion optimal à respecter.

La seconde conception défend une vision de l'univers en termes de destruction-crétion-complexification. Elle reconnaît à l'homme le droit de façonner son environnement et place l'environnement dans la durée. La notion de climax, populaire auprès des forestiers, s'inscrira dans le cadre d'une durée limitée. Un même site pourra donner lieu à différents climax au cours des âges.

Enfin, un troisième clivage se présentera entre une conception écocentrée et anthropocentrée de l'environnement (Hatem, 1990). La conception écocentrée promet la protection de tous les constituants d'un écosystème pour une raison éthique et non utilitariste. L'environnement possède une valeur intrinsèque qu'il s'agit de protéger des actions souvent néfastes de l'homme. Elle défendra une protection systématique de la nature et des écosystèmes.

La seconde approche privilégie la recherche du bien-être humain. Elle a pour objectif principal d'aider l'homme à vivre et à bien vivre dans son environnement. Pour reprendre les termes de Y. Veyret et P. Pech (1993) décrivant la démarche géographique de l'environnement, *“à travers la nature, c'est l'homme qu'il s'agit d'éduquer et de protéger, notamment lorsqu'il joue l'apprenti sorcier. En dégradant l'environnement au sein duquel il vit, l'homme met sa propre existence en danger. La nature est dans ce cas la périphérie et non le centre d'un système”*.

Notre ignorance de la capacité biotique du milieu pour l'espèce humaine pour un niveau de développement technologique et de confort des populations donné et la subjectivité associée aux questions de développement durable s'additionneront pour faire de l'élaboration de seuils de l'environnement une tâche particulièrement délicate. Nous aurons l'occasion de discuter de ce problème de façon plus approfondie dans les parties suivantes de cette étude.

En conclusion de cette première partie, il importe de souligner qu'une grande partie des efforts actuels en matière d'information de l'environnement se concentre sur la collecte des données environnementales, au détriment de leur analyse et, plus encore, de leur communication aux décideurs. Pour fournir une aide réelle à la décision, les données environnementales devront être interprétées, simplifiées, synthétisées et nuancées. Elles devront être communiquées aux décideurs à l'aide d'outils souples adaptés à la complexité des processus décisionnels, et permettre un dialogue constant entre l'analyste et le décideur.

Les bases de données gérées à partir d'un SIG sont d'excellents outils d'analyse pour le gestionnaire de l'environnement. En l'absence d'outils complémentaires de communication de l'information aux décideurs, elles seront par contre souvent inadaptées à la prise de décision stratégique. La prise de décision stratégique se fonde sur une information très agrégée et fortement interprétée. Un des principaux mécanismes pour une telle interprétation et agrégation est l'élaboration d'indicateurs et d'indices de l'environnement.

Les techniques d'agrégation des données devront être adaptées aux attentes des décideurs concernés. Suivant sa position dans le cycle de la prise de décision, chaque groupe en présence aura un besoin spécifique en matière d'information de l'environnement. Une même base de données permettra de développer différents jeux d'indicateurs d'environnement en fonction des buts poursuivis.

Lors de l'utilisation des indicateurs, il conviendra de garder en mémoire les incertitudes et la subjectivité associées à la sélection et à la pondération des différents paramètres qui les constituent. Les détracteurs des indices soulignent que les incertitudes et la subjectivité associées à la sélection et l'agrégation des différents indicateurs qui les constituent sont telles qu'ils perdent toute validité scientifique. Les débats sur les mérites respectifs des indicateurs simples et des indices pour représenter l'environnement illustrent deux positions traditionnellement opposées en matière de traitement de l'information pour l'aide à la décision. Dans un cas, les données fournies doivent être aussi complètes que possible, malgré la complexité qui peut en résulter ; dans l'autre, les données doivent être aussi simples et parlantes que possible, malgré la distorsion que peut engendrer cette simplification.

Notons que ces deux approches ne sont pas forcément exclusives. Les indicateurs composites capturent plus aisément l'attention des décideurs que des données physiques, chimiques ou biologiques brutes. De par leur pouvoir d'attraction, ils peuvent permettre d'établir un dialogue entre le décideur et l'analyste et de générer une discussion sur les données brutes et les hypothèses d'agrégation qui ont permis de constituer ces indicateurs composites. Ce point a été exprimé avec élégance par le prix Nobel 1998 d'économie, A. Sen, dans son analyse de l'impact de l'Indice de développement humain (PNUD, 1999) sur la formulation des politiques de développement :

«By skilful use of the attracting power of the HDI, Mahbub got readers to take an involved interest in the large class of systematic tables and detailed critical analyses presented in the Human Development

Report. The crude index spoke loud and clear and received intelligent attention and through that vehicle the complex reality contained in the rest of the Report also found an interested audience».

Dans la suite de ce document, nous aurons l'occasion de discuter de ces différents points de manière plus détaillée dans le contexte de l'élaboration d'indicateurs d'environnement pour le développement durable des hautes terres tropicales.

II PRESENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS

2.1 LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DU PROGRAMME STD3 - CT94-0310

2.1.1 Objectifs du programme

Dans le cadre d'une action de recherche financée par l'Union Européenne (DG XII) et coordonnée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM), la réalisation d'une base de données géographique a été entreprise pour trois provinces situées dans les hautes terres du Viet Nam : Thai Nguyen, Bac Kan et Lam Dong. L'objectif initial du programme STD3 - CT94-0310 était de développer une base de données pour deux provinces pilotes : Bac Thai et Lam Dong. La province de Bac Thai a fait l'objet d'un découpage administratif à la suite d'un décret signé en novembre 1996 et a été subdivisée en deux nouvelles provinces : Bac Kan et Thai Nguyen.

Cette réalisation est menée en partenariat avec l'Institut de Géographie du Centre National des Sciences Naturelles et de Technologie du Viet Nam (IG), l'Institut Français de Pondichéry (Inde), la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), l'Université Catholique de Louvain (Belgique) et le laboratoire de Génie de l'Environnement de l'Université de Paris VII-Diderot. Les trois provinces pilotes ont été choisies parmi les 66 du Viet Nam, en fonction de leur représentativité des conditions environnementales, socio-culturelles et économiques qui prévalent dans les hautes terres, lesquelles occupent 75 % de la superficie du pays. Le tableau 11 donne les caractéristiques principales des trois provinces étudiées.

Tableau 11 - Quelques caractéristiques des trois provinces pilotes

	Thai Nguyen	Bac Kan	Lam Dong
Localisation du centre de la province	75 km au nord de Hanoi	125 km au nord de Hanoi	200 km au nord-est de Ho Chi Minh Ville
Chef-lieu	Thai Nguyen	Bac Kan	Dalat
Superficie	3 532 km ²	4 867 km ²	9 780 km ²
Nombre d'habitants	1 060 300	310 000	954 710
Densité moyenne	300 hab./km ²	64 hab./km ²	97 hab./km ²
Amplitude altitudinale	De 30 à 1590 m	de 250 à 1530 m	de 200 à 2150 m
Produit provincial brut <i>per capita</i>	US\$ 132 en 1997	US\$ 64 en 1997 et 71 \$ en 1998	US\$ 169 en 1998
Pourcentage de hautes terres dans la province	60 %	100 %	90 %

Source : rapports du projet STD3 CT94-0310

L'objectif principal de ce projet STD3 - CT94-0310 de l'Union Européenne est de faciliter la prise de décision en matière de protection de l'environnement et de gestion durable des sols des hautes terres du Vietnam. À cet effet, les quatre activités suivantes ont été menées :

1. Constitution d'une base de données sur trois zones pilotes des hautes terres du Vietnam. Cette base de données est gérée par un système d'information géographique (SIG) et associée à l'utilisation de la télédétection.

2. À partir de la base de données, développement d'un système d'information de l'environnement et d'aide à la décision pour la gestion durable des hautes terres de Viet Nam. Le modèle est transposable au reste des hautes terres du Vietnam ainsi qu'à d'autres pays de la région (Laos, Cambodge) placés dans des conditions similaires: relief accidenté, fortes pluies de mousson, forêt tropicale, nouveaux défrichements par des migrants, agriculture pluviale, risques très élevés de dégradation des sols.
3. Par le biais de la géographie médicale, établissement d'un lien entre les problèmes d'agriculture et de santé, en particulier concernant le paludisme, à l'état endémique dans les hautes terres.
4. Renforcement du potentiel de recherche du Vietnam qui assurera la maintenance du système mis en place, son amélioration et son expansion régionale.

La présente recherche se place dans le cadre du second de ces objectifs : l'établissement d'un système d'information et d'aide à la décision pour le développement durable des hautes terres du Viet Nam. Le programme a débuté en avril 1995 et s'achèvera en novembre 1999. Il s'est déroulé en cinq étapes successives :

1. Identification et hiérarchisation des questions posées et des problèmes rencontrés par le biais d'une concertation précoce des parties concernées: scientifiques internationaux et nationaux, décideurs et gestionnaires provinciaux, représentants des districts et des communes.
2. Bilan des données existantes : certaines étaient simplement à collecter, d'autres ont été réactualisées ou acquises (éventuellement par des travaux sur le terrain).
3. Structuration de ces données biophysiques et économiques dans une base de données commune, gérée par un SIG.
4. Mise à disposition de ces informations acquises et structurées aux responsables des provinces concernées et formation des cadres locaux pour l'utilisation et la mise à jour régulière du système.
5. À partir du SIG, développement du système d'information de l'environnement et d'aide à la décision et application de ce système aux problèmes de conservation des terres des zones pilotes.
6. Communication des résultats de cette application de façon appropriée aux décideurs provinciaux.

2.1.2 Le système d'information géographique

L'établissement de trois bases de données provinciales gérées par un SIG constitue le point central du programme autour duquel vient s'appuyer l'ensemble des activités de communication et d'aide à la décision qui constituent le système d'information de l'environnement. Nous présentons ici brièvement la structure du SIG et le mode d'acquisition des données.

2.1.2.1 Structure du SIG

La base de données est constituée d'une structure centrale contenant les informations de base, autour de laquelle sont agencées les informations thématiques organisées par groupes de disciplines scientifiques (figure 13).

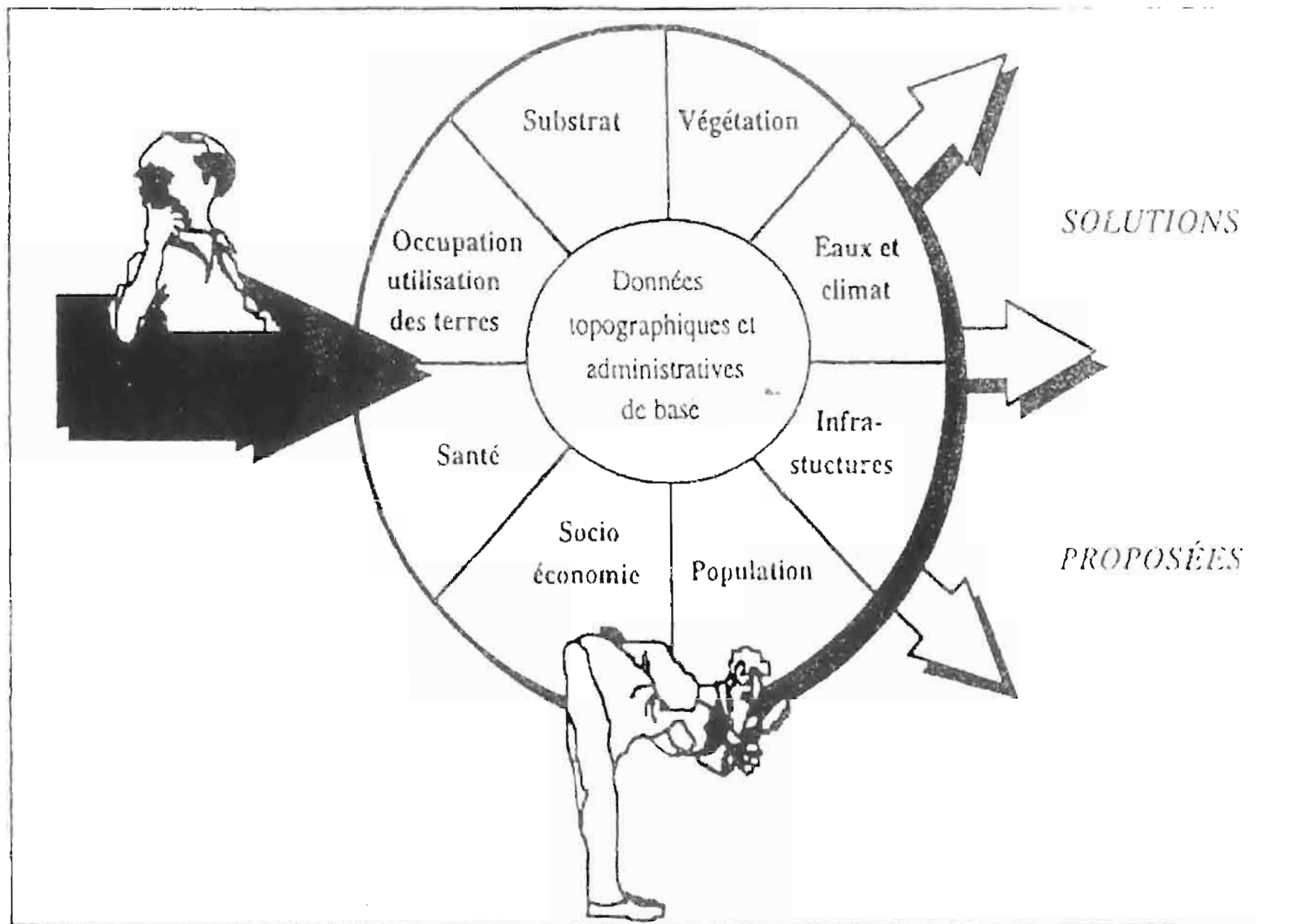


Figure 13 : Structure de la base de données géographique

Source. P. Brabant, J.C. Castella, S. Darracq, Y. Glemarec, Le Duc An, Nguyen Tran Cau, V. Simonneaux (Cahiers Agricultures - 1997)

La structure centrale contient les informations topographiques et administratives de base. Ces données sont issues pour la plupart de la numérisation des cartes topographiques aux 1/50 000 et 1/100 000. Elles sont structurées selon les thèmes suivants: coordonnées géographiques, courbes de niveaux, points géodésiques et points cotés, réseau hydrographique, routes et voies de chemin de fer, habitat, limites administratives. Le thème “courbes de niveau” est ici particulièrement important étant donné la configuration très accidentée du terrain: la pente constitue une contrainte majeure pour l’exploitation des hautes terres.

Le tableau 12 montre par exemple les données acquises pour la province de Thaï Nguyen concernant les thèmes “eau et climat” et “substrat”.

Tableau 12 - Données concernant les thèmes “Eaux et climat” et “Substrat”

Eaux et climat	Substrat
Réseau hydrographique naturel Canaux Aménagements hydrauliques Stations hydroélectriques Eaux de surface Eaux souterraines Données météorologiques Données hydrologiques Zones bioclimatiques Zones d’inondation (en saison pluvieuse)	Unités naturelles de terrain : zones de karst, zones montagneuses, vallées, plaines, plateaux, etc. Unités géomorphologiques et modelé Géologie : lithologie, stratigraphie, tectonique (faille, pendage), ressources minières Sols : répartition, description, propriétés physiques, chimiques et minéralogiques, état de dégradation, risque de dégradation.

En termes de configuration logicielle, le SIG est développé à partir du logiciel ARC/Info 7.03 sur station de travail SUN. ARC/info est un produit développé par *Environmental System Research Institute* (ESRI). Ce logiciel est actuellement le leader du marché. Il fonctionne avec différents systèmes d’exploitation tels que UNIX, DOS, WINDOWS NT et WINDOWS 95 et peut utiliser les informations enregistrées dans la plupart des bases de données relationnelles du marché. ARC/Info est aussi un outil fédérateur et peut devenir le serveur de données géographiques pour un certain nombre de produits ESRI dérivés tels que PC ARC/Info et Arcview (SIG bureautique).

Alors que le choix d’une version UNIX/workstation s’imposait pour un SIG à l’échelle nationale, des produits plus légers tels que PC ARC/Info et Arcview fonctionnant sur Windows 95 pourront être utilisés à l’échelle provinciale. L’adoption de systèmes plus légers à l’échelle provinciale réduira les besoins en formation PC ARC/Info et Arcview PC et facilitera la large diffusion et utilisation de la base de données.

2.1.2.2 Mode d’acquisition des données

Pour chacun de ces thèmes de la base de données, un groupe de travail a été constitué associant des scientifiques vietnamiens de l’IG et des instituts européens et indiens, en relation avec les services techniques provinciaux. Par exemple, les activités d’acquisition suivantes de données ont été réalisées par le groupe de travail “substrat” : (i) recherche et collecte des données sur les sols, le substrat géologique, la configuration du terrain ; (ii) examen de ces données pour savoir si elles sont utilisables en l’état ou si elles doivent faire l’objet d’une mise à jour ; (iii) réalisation des travaux de terrain nécessaires ; et (iv) production de nouveaux documents résultant de ces travaux.

Les données topographiques, géologiques et tectoniques, considérées comme relativement stables au cours du temps, et les données socio-économiques, fournies par les services techniques de la province et utilisées en l’état, n’ont pas fait l’objet de mise à jour. Par contre, cinq types de données ont été révisées : les sols, la végétation, les eaux de surfaces, l’occupation du sol, et l’utilisation des terres. Cela a été possible dans les délais impartis au programme grâce à l’utilisation de la télédétection.

En effet, une image Landsat couvre 34 225 km², surface plus de trois fois supérieure à la surface de la plus grande province étudiée, Lam Đông (9 953 km²). Étant donné la disposition des prises de vue (scène), une scène suffit à couvrir les provinces de Lam Đông et Thai Nguyen mais deux sont néanmoins nécessaires pour la province de Bac Kan.

La nébulosité importante dans les hauts plateaux du Viet Nam dont l'altitude atteint plus de 2000 mètres à Lam Đông a limité la disponibilité des images. Deux images Landsat de bonne qualité purent néanmoins être acquises (résolution au sol de 30 m). L'une de mars 1992 couvre la totalité de la province de Lam Đông. Elle correspond à la fin de la saison sèche, date propice pour faire apparaître les zones défrichées et cultivées en montagne. L'autre image d'octobre 1994 couvre la province de Thai Nguyen et une grande partie de celle de Bac Kan. La date est ici moins favorable car c'est la fin de la saison des pluies et les contrastes entre les différents types de couverts végétaux sont moins prononcés. De plus, certaines rizières sont toujours occupées par du riz encore vert, ce qui conduit à les confondre parfois avec la végétation naturelle.

Deux images SPOT panchromatiques (noir et blanc, spectre visible allant de 0,51µm à 0,73µm, d'une résolution au sol de 10 m) furent acquises pour réaliser une étude détaillée sur une partie de Thai Nguyen et de Lam Đông. Enfin, deux images Radarsat (satellite Canadien comprenant un radar à antenne synthétique de haute résolution-environ 10m), ont été obtenues pour Thai Nguyen : l'une d'août 96 et l'autre de décembre 96. Elles furent utilisées pour quantifier l'extension des zones d'inondation durant la saison pluvieuse (la couverture nuageuse empêche alors l'analyse d'images Landsat ou SPOT). L'interprétation des images fut parfois complétée par celles de photographies aériennes, en particulier pour Lam Đông (missions aériennes de 1952, 1969, et 1992).

2.1.3 Les indicateurs d'environnement

Afin de pleinement intégrer les données gérées par le SIG dans la formulation des politiques, une dernière activité du programme STD3 - CT94-0310 a consisté en l'élaboration d'un nombre limité d'indicateurs d'environnement. L'objectif principal de ces indicateurs est de faciliter la communication des informations acquises aux décideurs locaux et autres parties concernées. Les indicateurs devront permettre de synthétiser la masse de données biophysiques et socio-économiques disponibles au sein du SIG en un faible nombre d'informations directement pertinentes pour la prise de décision. De par leur pouvoir d'attraction, ces indicateurs composites devront aussi pouvoir faciliter un dialogue entre décideurs et analystes pour le développement durable des hautes terres tropicales.

Cette dernière activité est l'objet de la présente recherche. Le programme STD3 - CT94-0310 a achevé en premier la base de données de Thai Nguyen. En accord avec le calendrier du programme, les indicateurs d'environnement n'ont été développés de façon expérimentale que pour cette seule province. Néanmoins, les indicateurs et les méthodologies d'agrégation ont été sélectionnés de façon à pouvoir être aisément transposés aux deux autres provinces pilotes et, éventuellement, à l'ensemble des moyennes et hautes terres du Viet Nam. Avant d'aborder les critères retenus pour la sélection des indicateurs d'environnement, le chapitre suivant décrit brièvement l'état de l'environnement et les principaux mécanismes de dégradation des terres dans la province pilote de Thai Nguyen.

2.2 L'ÉTAT DE L'ENVIRONNEMENT DANS LA PROVINCE PILOTE DE THAI NGUYEN

2.2.1 État de l'environnement à Thai Nguyen

2.2.1.1 Le milieu

La province de Thai Nguyen est située dans la zone de transition entre le delta du fleuve Rouge et les montagnes du nord Viet Nam qui constituent l'ultime prolongement de la chaîne himalayenne. La carte

1 (voir annexe I - Cartes) indique la localisation de la province pilote de Thai Nguyen⁵. La carte 2 représente la distribution de sa population.

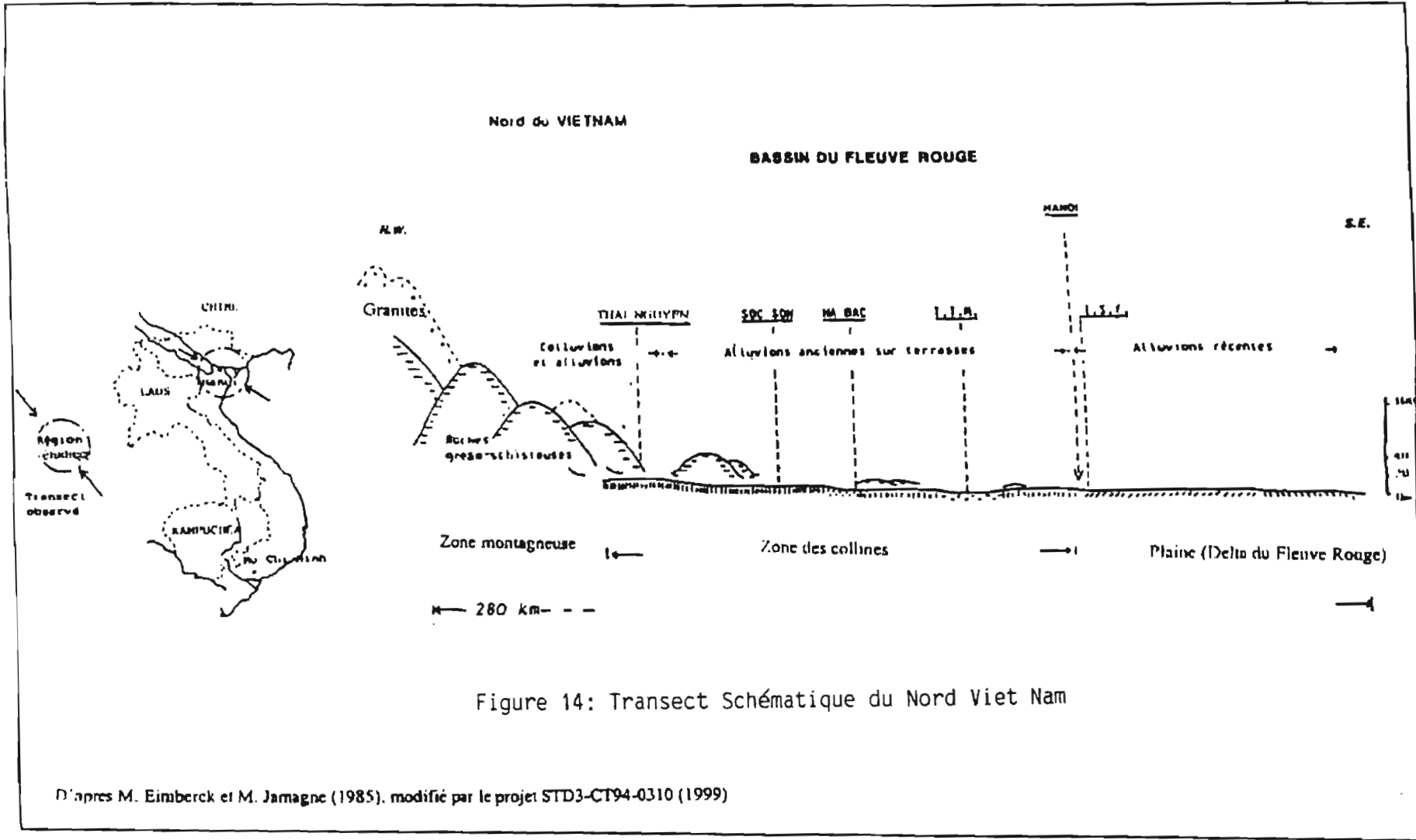
Cette région de piémont collinaire présente un relief très contrasté. La coupe topographique schématique du Nord Viet Nam indiquée sur la figure 14 est assez représentative de la province de Thai Nguyen. La topographie d'ensemble de la province est donnée carte 3. À partir de ces documents, quatre grandes zones peuvent être identifiées (Province de Thai Nguyen. Rapport explicatif, P. Brabant, S. Darracq, 1999) :

1. Les plaines : Les zones réellement planes correspondent à la partie nord-ouest de la plaine deltaïque du Fleuve Rouge et aux terrasses des rivières Sông Cau et Sông Công, principaux cours d'eau de la province. Elles sont occupées principalement par des rizières irriguées.
2. Zone de basses collines : Il s'agit d'une zone de plaine parsemée de petites collines défrichées et très souvent replantées en eucalyptus. Les zones basses, planes, sont cultivées en riz irrigué. Les habitations se situent généralement sur le pourtour des collines au bas des pentes.
3. Zone de hautes collines : Elle correspond à une évolution de la zone de basses collines. D'abord espacées dans la plaine, les collines deviennent de plus en plus nombreuses et de plus en plus hautes à mesure que l'on se rapproche de la zone montagneuse. Elles finissent par couvrir la majeure partie du terrain. Elles sont couvertes soit de végétation naturelle arbustive ou buissonneuse, soit de plantations d'eucalyptus ou de cultures de thé. Les quelques bas-fonds cultivables sont occupés par du riz irrigué quand l'eau est disponible.
4. Zone de montagne : La zone de montagne est représentée par les parties nord et est de la province, par un secteur situé au nord du réservoir de Nui Coc et vers le sud-ouest par le massif de Tam Dao culminant à 1592 m. Les versants sont recouverts de toute une gradation de type de végétation allant de la forêt dense, encore présente sur quelques sommets élevés, à la jachère herbacée récente, résultant de l'abandon d'une parcelle d'agriculture récurrente sur brûlis. Les couverts les plus répandus sont toutefois la forêt dégradée et les buissons. Dans les vallées, parfois larges, qui sillonnent ces montagnes, la culture dominante reste le riz irrigué.

2.2.1.2 Pressions sur le milieu

Pour comprendre les défis rencontrés par la province de Thai Nguyen pour un développement rural durable, il est important de fournir quelques éléments d'histoire foncière. La province de Thai Nguyen est une région d'occupation ancienne par la population d'ethnie *Tay*. Les Tays exploitaient essentiellement les bas-fonds, où ils pratiquaient une riziculture inondée à une seule saison, complétée par la défriche sur brûlis sur le bas des versants. Des *Daos*, puis des *H'mongs*, arrivés depuis moins de deux siècles, se limitaient à une agriculture itinérante de défriche brûlis sur l'étage supérieur, et ceci jusqu'à la collectivisation agricole (GRET, 1995). Aujourd'hui, huit minorités ethniques existent dans la province : *Tay, Nung, Dao, H'mong, San Chi, San Diu, Cao Lan, Hoa*; elles représentaient au total 25 % de la population en 1997, alors que le pourcentage de kinhs était de 75 % (Projet CT94-0310). Le taux de croissance démographique est passé de 2,12% à 1,97% en 1998.

⁵ Le nom et les limites administratives des 66 provinces du Viet Nam sont indiquées sur la carte 9.



L'indépendance de 1954 s'est traduite par une réforme agraire, avec l'expropriation des gros propriétaires et une redistribution des terres. La collectivisation quasi complète des moyens de production fut réalisée à partir de 1960. Les populations ont été rassemblées dans les vallées qui ont été l'objet d'aménagements hydrauliques importants. En même temps, l'Etat procéda à des innovations techniques significatives dans la riziculture. La conséquence en a été l'abandon de la culture sur les pentes au profit d'une forte intensification dans les vallées (passage de une à deux cultures de riz par année, avec irrigation par dérivation sur les rivières). On organisa autoritairement l'installation de villages fixes pour sédentariser les communautés *Dao* et pour accueillir des immigrants *Kinh* en provenance du delta.

La période de fonctionnement coopératif dura ainsi vingt ans. En 1981, sous le poids des problèmes financiers des coopératives, de la corruption presque généralisée, de la stagnation de la production, et du désintérêt des paysans pour une agriculture collective, les premières mesures allant vers une décollectivatisation de l'agriculture apparurent (Résolution Numéro 100). La terre fut attribuée individuellement, les animaux des coopératives furent vendus aux paysans, et ces derniers furent incités économiquement à travailler et à produire davantage. À partir des années 80, l'augmentation de la population obligea aussi à nouveau le gouvernement à autoriser les cultures de pentes, au moins sur les premiers contreforts des versants.

La résolution Numéro 10 marqua en 1988 une étape supplémentaire dans la décollectivatisation de l'agriculture. La terre fut attribuée aux paysans pour au moins cinq ans, les points travail disparurent, et la coopérative fut réduite à une fonction de perception des taxes. En 1989, l'application de la résolution No 10 dans le nord de Thai Nguyen aboutit à restituer les terres à leurs anciens propriétaires d'avant la collectivisation. Ceux qui s'étaient fixés dans la région entre-temps (*Dao* et immigrants *Kinh*) se trouvèrent dépossédés et durent trouver de nouvelles terres sur les pentes et les vallées secondaires, à partir desquelles ils relancèrent la défriche de la forêt.

Les jeunes qui s'installent de nos jours rencontrent ce même problème de manque des terres disponibles et sont aussi obligés de s'établir sur les pentes.

La dynamique de dégradation des sols et de l'environnement générée par la pression démographique et le flou foncier sont associés à la très faible productivité agricole et à l'insuffisance alimentaire. Les diagnostics réalisés sur plusieurs communes de Thai Nguyen par le programme GRET/CNEARC montrent que la moitié des exploitations ne trouve plus leur autosuffisance alimentaire avec les systèmes rizicoles de vallées et doivent, par conséquent, exploiter plus intensivement les parties hautes des collines (GRET, 1995). Cependant, il est à craindre que les pratiques traditionnelles de défriche brûlis ne soient plus adaptées aux conditions actuelles de pression démographique et aux nouveaux rapports de production, notamment au niveau de l'accès au foncier.

2.2.1.3 Occupation des sols et variations du couvert forestier

À partir de l'interprétation d'images satellitaires et d'observation de terrain, le programme STD3 - CT94-0310 a établi un inventaire de l'occupation des sols pour la province de Thai Nguyen. Les résultats de cet inventaire sont donnés au tableau 13 et visualisés sur la carte 4.

Tableau 13 - Occupation des sols dans la province de Thai Nguyen

Occupation des sols	Localisation	% de la province	
Forêts naturelles peu ou pas perturbées	Forêts denses sur karst	2,6 %	7,8 %
	Forêts denses sur autre substrat	2,0 %	
	Forêts ouvertes	2,1 %	
	Forêts ouvertes sur karst	1,1 %	
Zones à végétation spontanée, arbustive, buissonnante, herbacée, localement arborée, bambous, friches	Zone montagneuse	28,7 %	38,7 %
	Zone des collines	10,0 %	
Zones cultivées	Cultures annuelles dans les plaines et les vallées (cultures irriguées dominantes)	31,5 %	49,9 %
	Cultures annuelles sur les versants des zones montagneuses et des collines (cultures pluviales)	14,2 %	
	Cultures pérennes (théiers, fruitiers et divers)	4,2 %	
Divers	Surface en eau	1,0 %	3,8 %
	Exploitation minière (ciel ouvert)	0,25 %	
	Habitat urbain dense	0,25 %	
	Habitat rural	2,30 %	
TOTAL			100 %

Source : Rapport explicatif, province de Thai Nguyen, Projet STD3 - CT94-0310 (P. Brabant, S. Darracq, 1999).

La carte 5 représente les différents types de végétation et la carte 6 les forêts naturelles peu ou pas perturbées. La superficie des forêts naturelles estimée par le projet STD3-CT94-0310 à partir de l'interprétation d'images satellitaires est de 27 700 hectares, à comparer aux 74100 hectares mentionnés par les statistiques provinciales (Rapport explicatif, Province de Thai Nguyen, projet STD3, p. 97). Cette importante différence provient en grande partie de la définition du terme « forêts naturelles ». L'encadré 2 donne les définitions utilisées pour la forêt par le projet STD3 - CT94-0310.

Encadré 2 : Définitions utilisées pour la forêt dans le cadre du programme STD3-CT94-0310

Forêt naturelle : formation végétale arborée jamais ou peu perturbée par les activités humaines ; ou formation végétale arborée déjà défrichée dans le passé, mais qui s'est régénérée naturellement pendant une période de 60 ans au moins, sans être perturbée par les activités humaines. La canopée couvre plus de 70% du sol.

Forêt naturelle dense : c'est une formation dont la canopée couvre plus de 70 % du sol et où la hauteur des arbres atteint 25 mètres dans les terrains situés à une altitude inférieure à 600 m ; elle est constituée de 4 strates. À une altitude plus élevée et sur les karsts, la hauteur de la canopée est de 15 m et la forêt ne comporte plus que 3 strates.

Forêt naturelle ouverte : c'est une formation dense à l'origine, mais qui a été modérément exploitée. La canopée couvre de 40 à 70% du terrain et les strates sont irrégulières.

Forêt secondaire : formation végétale qui est une phase de reconstitution d'une forêt naturelle qui a été dégradée. La reconstitution de la biomasse peut s'effectuer en 60 à 80 ans, parfois plus. La période nécessaire pour la reconstitution de la biodiversité est beaucoup plus longue : de l'ordre du millénaire ou plus.

Déforestation : destruction des forêts naturelles ou de forêts secondaires régénérées à strate arborée dominante.

Déboisement : destruction de la végétation pour les cultures annuelles dans les zones à agriculture récurrente. Ces défrichements se font sur les anciennes friches arbustives, arborées ou à bambous.

Aforestation : régénération naturelle d'une forêt dégradée.

Reboisement : réalisation de plantations forestières, souvent mono spécifiques.

Terres dénudées : traduction de l'expression vietnamienne « *Dat trong* ». Il s'agit de terres qui devraient être couvertes de forêts selon la législation, mais qui ne le sont pas. Cependant, le couvert végétal spontané peut être très dense, formé d'arbustes, de buissons, ou d'espèces herbacées. Ces terres sont rarement dépourvues de tout couvert végétal. Le terme de « terres dénudées » (traduction de *Dat trong* en français) ou « barren lands » (en anglais) n'est donc pas approprié.

Les principales essences rencontrées en forêts denses dans la province sont (T. Bouix, 1998) : *Dipterocarpus retusus*, *Vatica tonkinensi*, *Aphanamixis polystachya*, *Dracantomelum duperraenum*, *Dsyoxylum gobarum*, *Elaeocarpus dubius*, ... et sur les karsts : *Burretiodendron hsienmu*, *Dimerocarpus breneri*, *Diospyros pyrrocarpa*, *Ficus gibbosa*, *Pometa pinnata*, *Taxotropis ilicifolius*, ... Par ailleurs, les essences dominantes en forêts ouvertes sont : *Gossipium arboreum*, *Sterculia thymenocalyx*, *Livingstonia chinensis*, *Antidesma fordii*.

Du fait de la pression humaine et de l'état avancé de dégradation du couvert forestier, une large partie de la biodiversité de Thai Nguyen a disparu. Les grands mammifères comme les tigres, léopards et ours, autrefois très nombreux dans la province, ont entièrement disparu. Les derniers représentants des nombreuses espèces de singes, de reptiles et d'oiseaux sont aujourd'hui menacés de disparition. La diversité de la faune et de la flore serait cependant préservée par la conservation des formations forestières. Le Service provincial de la Science, de la Technologie et de l'Environnement (DOSTE, 1995) estimait ainsi à 522 le nombre d'espèces végétales différentes dans l'ancienne province de Bac Thai.

Au moins 17 espèces nouvelles de reptiles et d'amphibiens ont été découvertes dans le Parc Naturel de Tam Dao au sud-ouest de la province depuis 1982. Plus de 108 espèces de serpents ont été identifiées à Tam Dao, soit 4 % du total global de 2 700 espèces (M. McRae, 1999). Selon ce critère, le parc abrite l'un des écosystèmes les plus divers et les plus riches de la planète.

Cette variété exceptionnelle s'explique par la position géographique du parc. Le massif du Tam Dao est une zone de transition où sont à la fois représentées les espèces des forêts tropicales d'Asie du sud-est, des forêts tempérées du sud de la Chine et des forêts alpines de l'est de la chaîne himalayenne. De plus, le Tam Dao s'élève de façon abrupte du Delta du Fleuve Rouge et constitue un îlot protégé favorisant une forte endémicité. Cette biodiversité est aujourd'hui menacée par une demande touristique intérieure

et internationale en pleine expansion. Les formations forestières en bordure du parc sont peu à peu défrichées pour faire place à des complexes touristiques tandis qu'un commerce illicite mais actif de la biodiversité est en pleine floraison (M. McRae, 1999).

En sus de la réduction de la biodiversité, le déboisement serait aussi à l'origine d'une forte érosion des sols, d'une fréquence et d'une gravité accrue des inondations pendant la saison des pluies et du tarissement de plusieurs cours d'eau à Thai Nguyen pendant la saison sèche (DOSTE, 1995). L'érosion des sols se produirait à la fois sous forme d'érosion en nappes, en rigoles et en ravines.

Peu d'études de terrain avaient jusqu'à présent été menées pour déterminer le degré exact d'érosion des sols et une forte incertitude existait quant à sa gravité. En effet, le pourcentage élevé de végétation spontanée ou permanente (54,3 %) pourrait fortement limiter l'impact de la déforestation et du déboisement sur l'érosion des sols. L'un des objectifs du projet STD3-CT94-0310 est d'étudier de plus ample manière cette question fondamentale pour le développement durable des hautes terres du Viet Nam. Nous aurons l'occasion dans la suite de ce document de présenter en détail les résultats obtenus par le projet dans ce domaine.

La carte 7 indique la distribution morpho-pédologique des sols de Thai Nguyen, d'après les travaux réalisés par le projet STD3. D'une façon générale, les sols de la province sont de qualité faible à moyenne car pauvres en éléments minéraux et en matière organique. Plusieurs mécanismes sont à l'origine de la dégradation de ces sols. En sus des phénomènes d'érosion, l'exploitation depuis des millénaires de parcelles rizicoles en l'absence d'amendement organique suffisant a provoqué en zone de plaine un appauvrissement intense des horizons de surface, ainsi que l'apparition d'un horizon compact, très dense, à faible profondeur (M. Eimberck, M. Hardy, M. Jamagne, 1987).

2.2.1.4 Ressources minérales

La province de Thai Nguyen est riche en minéraux. Le DOSTE recensait 117 mines différentes dans l'ancienne province de Bac Thai, dont 19 considérées comme "grandes", 11 comme "moyennes" et 87 comme "petites". À partir de mines à ciel ouvert, Thai Nguyen assure, avec la province de Quanh Ninh, la plus grande partie de la production nationale de charbon. Elle produit aussi du minerai de fer, de zinc, de plomb et plusieurs métaux précieux comme l'or et l'argent. La province de Thai Nguyen est enfin un centre de production important de pierres de construction. Du point de vue de l'environnement, le charbon du Nord Viet Nam est de grande qualité avec un faible taux en sulfure (habituellement < 0.5 % comme dans la province de Quanh Ninh). Cette faible concentration en sulfure signifie que sa combustion, même en grande quantité, ne contribue que faiblement à la formation de pluies acides (MOSTE/UNDP. *Red River Delta Master Plan*, vol. 27, 1995).

Le rapport sur l'environnement de l'ancienne province de Bac Thai (DOSTE, 1995), qui regroupe les provinces actuelles de Thai Nguyen et de Bac Can, cite l'exploitation minière à ciel ouvert comme une cause importante de déboisement, de pollution de l'eau et de l'air, et de destruction de terres agricoles. Les activités aurifères seraient notamment à l'origine de fortes concentrations en mercure et en arsenic dans les rivières. Dans de nombreux endroits, des concentrations en CO₂, SO₂, plomb et particules solides liées à l'exploitation minière dépassant jusqu'à dix fois les normes autorisées ont été relevées. Des rejets liés à des exploitations d'étain et de plomb ont été incriminés pour des affections graves du système nerveux et cérébral, spécialement chez les enfants en bas âge.

L'UNICEF a récemment mis en place un programme de suivi des métaux lourds, et notamment de l'arsenic, au Viet Nam. Bien qu'il n'y ait point encore de données disponibles pour Thai Nguyen, des concentrations extrêmement élevées, pouvant atteindre jusqu'à 2 mg/l, ont été relevées dans des provinces limitrophes du delta du Fleuve rouge⁶.

⁶ La concentration maximum permissible en arsenic préconisée par l'OMS dans l'eau de boisson est de 0.01 mg/l. Cette concentration maximum très stricte s'explique par la corrélation étroite entre la présence d'arsenic dans l'eau de boisson et une incidence accrue de différents cancers.

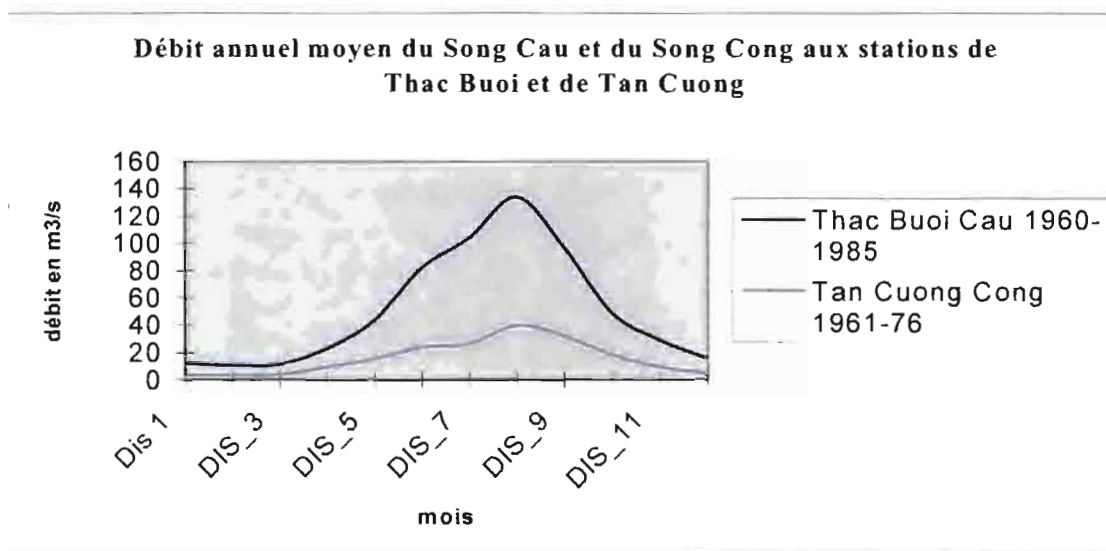
2.2.1.5 Ressources et qualité des eaux

a. Ressources en eau

La province de Thai Nguyen est située dans le bassin de Thai Binh. Ce bassin est connecté au bassin du Fleuve rouge par la rivière Duong. Thai Nguyen peut donner une impression superficielle d'abondance en ressources en eau. Ainsi le rapport sur l'environnement de la province de Thai Nguyen déclare que « la province dispose d'importantes ressources en eau de surface, d'un total d'environ 2 milliards de m³. Cette ressource en eau alimente non seulement Thai Nguyen, mais aussi les provinces de Bac Giang, Bac Ninh, Vinh Phuc et la ville de Hanoi » (DOSTE, 1997).

Cette impression est néanmoins trompeuse du fait de la très forte variabilité saisonnière du régime hydrologique. Selon les données hydrologiques disponibles au sein du SIG, le débit des trois mois consécutifs d'étiage minimal ne représente que 5 à 6 % de l'écoulement annuel du Song Cau et du Song Cong, les deux principales rivières de Thai Nguyen. La carte 8 indique la localisation des stations hydrologiques de Thai Nguyen et la figure 15 représente les débits moyens mensuels aux stations de Thac Bui et de Tan Cuong. Cette très forte variabilité saisonnière du régime hydrologique se traduit par des risques élevés d'inondations pendant la saison des pluies et des débits de saison sèche insuffisants pour répondre aux demandes en eau agricole, industrielle et domestique de la province.

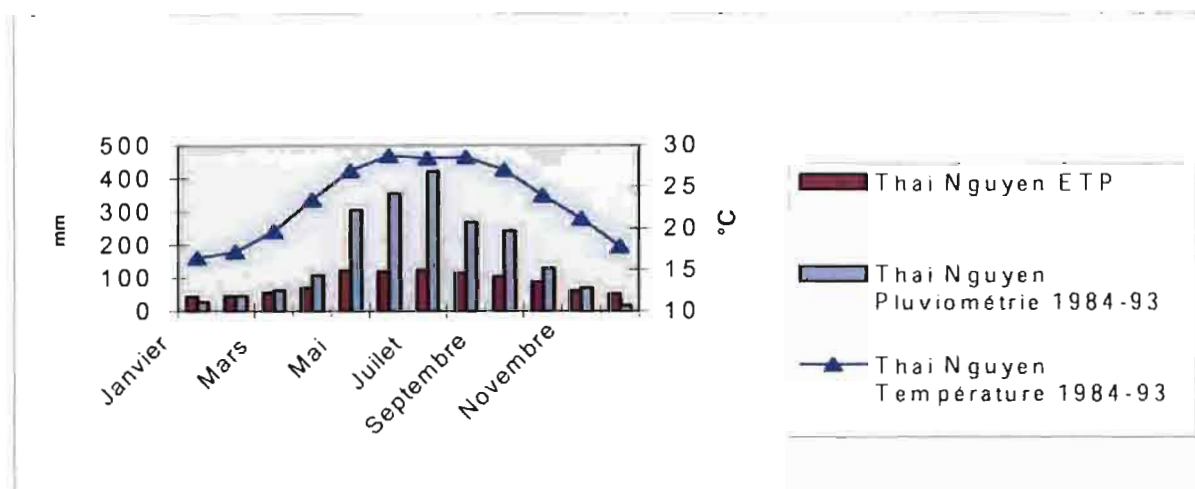
Figure 15 : Courbes des débits des deux principales rivières de Thai Nguyen



Cette variabilité des débits résulte d'une forte irrégularité des précipitations. Thai Nguyen reçoit, en année normale, de 1 500 à 2 000 mm d'eau. Comme indiqué par le diagramme ombrothermique de la station de Thai Nguyen (figure 16), cette quantité d'eau suffirait à assurer des récoltes normales de riz, si elle était régulièrement répartie. Malheureusement, les pluies tombent en chutes brusques, souvent orageuses. De plus, une saison sèche de cinq mois a lieu de novembre à mars. Pendant cette période, les précipitations mensuelles ne dépassent guère 15-60 mm, à comparer aux 250-450 mm par mois pendant la saison des pluies.

La saison sèche coïncide avec la période de repiquage du riz d'hiver, une des deux plus fortes périodes de demande en eau de l'année. Du fait de l'irrégularité des précipitations, l'irrigation est indispensable pendant toute l'année pour assurer le maintien d'une production rizicole suffisante pour l'alimentation de la population. Ceci se traduit par des prélèvements en eau agricole très importants pendant la période d'étiage. L'impact de ces déficits saisonniers sur la production agricole est aggravé par la faible capacité des infrastructures existantes de rétention des eaux (Silver, 1999).

Figure 16 : Diagramme ombrothermique pour la station météorologique de Thai Nguyen



En termes de ressources en eaux souterraines, des aquifères superficiels sont présents sur l'ensemble de la province avec une concentration plus élevée dans le sud de la province. Ces aquifères superficiels comportent une couche supérieure (4 à 20 mètres d'épaisseur) de matériaux d'altération très fins au rendement faible mais suffisant pour l'alimentation en eau potable des populations à partir de puits creusés à la main. Ils comportent aussi une couche plus profonde de matériaux plus grossiers au débit modéré. Par endroits, un aquifère profond peut aussi être atteint aux travers de fissures karstiques. Cet aquifère profond offrirait un bon débit (CERPAD/DANIDA, 1996).

b. Pollution de la ressource en eau

Il existe très peu d'informations sur la pollution de l'eau au Viet Nam. Le système de suivi de la qualité de l'eau reste à l'état embryonnaire. L'Institut météorologique et hydrologique du Viet Nam (IMH) débuta un programme de suivi mensuel de la qualité de l'eau dans 48 localités différentes en 1991. Malheureusement, ce programme ne porte que sur un nombre très limité de paramètres (pH, température, cations, anions, conductivité électrique (WB, ADB, FAO, UNDP, 1996).

Le Ministère pour la Science, la Technologie et l'Environnement (MOSTE) a établi en 1995 un réseau de suivi de la qualité des eaux de surfaces afin de collecter les informations nécessaires à la préparation de rapports trimestriels et annuels sur l'environnement au Viet Nam. Ces rapports sont classés confidentiels (MARD/DANIDA, 1999).

Les problèmes de qualité de l'eau peuvent être d'origine biologiques, chimiques et physiques. Sur la base des informations disponibles au sein du SIG et de rapports récents des services provinciaux, nous essayerons ici d'évaluer l'importance de chacune de ces formes de pollution à Thai Nguyen.

Pollution biologique et chimique

L'économie de la province de Thai Nguyen est en majorité agricole. Un développement rapide de petites et moyennes entreprises est néanmoins observé. En 1997, 141 entreprises d'état et 120 entreprises privées étaient recensées à Thai Nguyen (*Viet Nam Business*, 1997). Les principaux secteurs industriels sont l'exploitation minière, la métallurgie, les ateliers de mécanique, la production de matériaux de construction, les industries agroalimentaires et la confection. Les entreprises les plus importantes sont situées à Thai Nguyen et comportent des brasseries, une usine sidérurgique et une fonderie de plomb et d'étain.

Seuls les principaux centres urbains de la province bénéficient actuellement d'un approvisionnement partiel en eau potable. La capitale provinciale Thai Nguyen est desservie par quatre réseaux

d'alimentation en eau potable qui approvisionnent moins de trente pour cent de la population. Le reste des habitants utilise des puits individuels ou des sources pour leur alimentation en eau (DOSTE, 1995). Les eaux usées domestiques et industrielles sont directement déversées dans les cours d'eau sans traitement préalable. Bien que la ville de Thai Nguyen produise plus de 26 000 tonnes de déchets solides par an, il n'existe actuellement qu'une seule décharge publique en opération à Doc Lin.

Il est difficile d'évaluer l'impact exact de la pollution urbaine et industrielle à Thai Nguyen. Les bases de données hydrologiques du projet STD3-CT94-0310 ne comprennent pour l'instant que des relevés anciens de qualité de l'eau effectués aux stations hydrologiques de Thac Bui et Gia Bay sur la rivière Cau (voir carte 8) en sus des résultats de 8 analyses d'eau réalisées en novembre 1995. Les relevés de Thac Bui couvrent la période 1964-1985 et ceux de Gia Bay la période 1972-85. Ces analyses ne concernent qu'un nombre très limité de paramètres (pH, DCO, cations, anions, dureté). À l'exception de la DCO, elles ne comprennent pas de paramètres fondamentaux de qualité de l'eau comme la DBO, les métaux lourds, les coliformes totaux ou encore les composés organiques persistants.

Le nombre très limité de données et leur ancienneté rendent l'interprétation de ces résultats aléatoires. En gardant ces limites à l'esprit, les données des stations de Thac Bui et Gia Bay semblent indiquer une bonne qualité chimique de l'eau de la rivière Cau pendant ces périodes. Une analyse comparée des données de ces deux stations et des normes de l'OMS et du Viet Nam est donnée en annexe V.

Les analyses de novembre 1995 comprennent des mesures de demande biologique en oxygène et d'oxygène dissous ainsi que des principaux métaux lourds. Les résultats de ces analyses sont donnés en annexe V. Ces analyses semblent indiquer une très bonne qualité des eaux. Sur la base de ces analyses, les eaux de Thai Nguyen étaient presque exemptes de pollution organique et en métaux lourds aux sites testés en novembre 1995. Ces analyses ne comprennent malheureusement pas de mesures de coliforme fécaux et ne peuvent nous renseigner sur la contamination fécale dans ces sites à cette date.

Une étude de rapports récents des services provinciaux et d'organisations internationales sur la pollution de l'eau à Thai Nguyen peut nous aider à mettre en perspective les données disponibles au sein du SIG. Le rapport 1997 sur l'environnement signale une pollution importante de la rivière Cau dans les zones industrielles de Thai Nguyen (DOSTE, 1997). Cette pollution semble néanmoins localisée aux abords immédiats des centres industriels et urbains. Une étude de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement de Thai Nguyen menée par DANIDA et le CERPAD en 1996 mentionne des taux de BOD variant de 1 à 8 mg/l, de coliformes totaux de 0 à 100 000 et d'oxygène dissous de 6-10 mg/l dans la rivière Cau en aval de Thai Nguyen. Sur la base de ces résultats, le rapport d'étude de DANIDA et du CERPAD conclua que la pollution organique était relativement faible en termes de préservation du milieu aquatique mais que la pollution fécale pouvait être importante.

Le profil de mortalité et de morbidité de Thai Nguyen semble confirmer cette analyse. Il fait apparaître une prédominance des maladies associées à la contamination fécale de l'eau, comme la dysenterie, les diarrhées ou encore les parasitoses intestinales. Le tableau 14 présente le taux d'incidence des six principales causes de mortalité et de morbidité dans la province pilote :

Tableau 14 - Les principales causes de mortalité/morbidité à Thai Nguyen

Maladie	Nombre de cas 1998	Incidence annuelle pour 100 000 habitants
Pneumonie	9 438	943
Diarrhée	6 846	684
Angine	4 866	486
Infections respiratoires aiguës	4 831	483
Parasites	1 660	166
Maladies de peau	856	85

Source: CERPAD/DANIDA, 1996.

L'incidence des diarrhées, à comparer au taux national de 1 327 pour 100 000 habitants (1995), est probablement sous-estimée. Nous reviendrons sur ce point dans la suite de notre étude. Même avec un taux de diarrhées minoré, les maladies liées à la contamination fécale de l'eau dominent le profil de mortalité et de morbidité de Thai Nguyen. Cette forte incidence de la contamination fécale pourrait s'expliquer par : (i) l'utilisation des excréta humains comme amendements organiques au nord Viet Nam ; (ii) une alimentation en eau à partir de puits non protégés et des cours d'eau ; (iii) la prépondérance de la défécation en plein air et le faible taux de latrines sanitaires.

Pollution physique

Les concentrations annuelles moyennes en sédiments enregistrées aux stations hydrologiques de Thac Bui, Giang Tien, Cau Mai et Tan Cuong (voir carte 8) oscillent entre 108 et 245 mg/l. Ces concentrations sont de très loin supérieures aux normes préconisées pour l'alimentation en eau, la production industrielle, les activités récréatives ou la protection des écosystèmes aquatiques. Le tableau 15 rappelle ces différentes normes. Les particules en suspension affectent la qualité de l'eau de plusieurs façons. L'eau turbide est difficile et onéreuse à filtrer et sa désinfection exige de fortes doses de désinfectants chimiques. Les composés agrochimiques et les minéraux lourds transportés par ces sédiments peuvent entraîner des phénomènes d'eutrophisation des réservoirs et de toxicité liés à l'ingestion d'éléments comme le mercure ou l'arsenic. En enfouissant les organismes vivant sur le lit des rivières et en réduisant l'intensité des radiations solaires, les sédiments sont également nocifs à la vie aquatique (Jain *et al.*, 1993).

Tableau 15 - Turbidité tolérable de l'eau selon les usages

Mode d'utilisation de l'eau	Turbidité tolérable (mg/l)
Alimentation en eau potable	5
Industrie :	
- Mise en conserve	10
- Refroidissement	50
- Papier d'emballage	25
- Papier fin	5
- Textiles	5
Récréation :	
- Natation	10
- Canotage	20
Protection des écosystèmes aquatiques	35

Source: Chang, 1982, Jain and al., 1993.

Bien que jusqu'à 50 fois supérieures aux normes d'alimentation en eau potable, ces concentrations sont pourtant relativement faibles comparées à celles qui sont rencontrées dans les sections amonts du Fleuve rouge et de la rivière Da (supérieures à 1000 mg/l) et dans la grande majorité du réseau hydrographique du Nord du Viet Nam.

Notons aussi qu'il ne s'agit pas d'un phénomène récent, que nous pourrions immédiatement corréler à la déforestation foudroyante de ces cinquante dernières années. Dans son ouvrage "*La culture du riz dans le Delta du Tonkin*", René Dumont notait déjà en 1935 que le Fleuve Rouge "*charrie de fortes quantités de limons argileux, de 0,5 kg en saison sèche à 3,5 kg/m³ d'eau en crues*" et que les rivières Cau, Tuang et Luc-Nam "*charrient beaucoup moins (0,1 à 1 kg/m³ de limons) que le Fleuve Rouge*".

À un tel niveau de concentration, un autre problème associé aux sédiments transportés est la réduction de vie des infrastructures hydrauliques. Du fait de l'état parcellaire des informations hydrologiques au Viet Nam, il convient néanmoins de souligner que de fortes différences de vues existent quant à l'impact de la sédimentation sur la durée de vie des ouvrages hydrauliques dans le pays. La revue sectorielle pour l'environnement de la Banque Mondiale estime que le volume de sédiments charrié par la rivière Da est tel que le réservoir de Hoa Binh, le plus vaste réservoir du Viet Nam originalement conçu pour une durée

de vie de 250 ans, sera comblé d'ici 50 à 70 ans. Sur la base d'une étude des concentrations en sédiments de la rivière Da et de mesures annuelles de circonférence du réservoir, le MOSTE et le PNUD estiment par contre cette durée de vie à plus de 150 ans, toutes autres conditions restant semblables (*Red River Delta Master Plan, Background Paper 1, 1995*).

2.3 SELECTION DES INDICATEURS

2.3.1 Critères de sélection d'indicateurs d'environnement

Les indicateurs répondant à différents besoins, il est nécessaire de définir des critères généraux de sélection des indicateurs. Cette étude reprendra les trois critères de base adoptés par l'OCDE : (i) la pertinence politique et utilité pour les utilisateurs ; (ii) la justesse d'analyse ; et (iii) la mesurabilité. La définition donnée par l'OCDE de ces trois critères est reproduite dans l'encadré 3.

Encadré 3 : Critères de sélection des indicateurs*

Pertinence politique et utilité pour les utilisateurs

Un indicateur d'environnement devrait :

- Donner une image représentative des conditions de l'environnement, des pressions exercées sur lui ou des réponses de la société.
- Être simple, facile à interpréter et permettre de dégager des tendances.
- Représenter les modifications de l'environnement et des activités humaines correspondantes.
- Servir de référence aux comparaisons internationales.
- Être de portée nationale ou représentatif de problèmes régionaux d'environnement revêtant un intérêt national.
- Se rapporter à une valeur limite ou une valeur de référence à laquelle le comparer, de sorte que les utilisateurs puissent évaluer sa signification.

Justesse d'analyse

Un indicateur d'environnement devrait :

- Reposer sur des fondements théoriques sains, tant en termes scientifiques que techniques.
- Reposer sur des normes internationales et sur un consensus international quant à sa validité.
- Pouvoir être rapporté à des modèles économiques, des systèmes de prévision et d'information.

Mesurabilité

Les données nécessaires pour construire un indicateur devraient :

- Être immédiatement disponibles ou être accessibles à un coût-bénéfice raisonnable.
- Être accompagnées d'une documentation adéquate et de qualité connue.
- Être mises à jour à intervalles réguliers selon des procédures fiables.

**Ces critères se réfèrent à un indicateur "idéal". Ils ne sauraient être tous réunis nécessairement dans la pratique.*

Source : OCDE (1997).

2.3.1.1 Pertinence politique et utilité pour les utilisateurs

Sur la base des données discutées au chapitre précédent, les principaux problèmes d'environnement dans la province pilote de Thai Nguyen sont : (i) le déboisement et la perte de biodiversité ; (ii) l'érosion des sols ; (iii) les risques de pénurie en eau ; et (iv) la pollution des eaux. En accord avec cette analyse, il est proposé d'élaborer des indicateurs composites de dégradation des terres pour refléter cette

problématique environnementale et aider au développement durable des hautes terres du Viet Nam. De manière similaire au terme "land" en langue anglaise, le terme «terre» est ici utilisé dans un sens très large et recouvre à la fois les sols eux-mêmes, les ressources en eau et la végétation. Le terme terre doit donc s'entendre dans le sens d'une unité agro-écologique et non pédologique.

Les moyennes et hautes terres tropicales disposent d'un large éventail de ressources naturelles (sols, eau, forêt, pâturages, faune sauvage, minéraux, etc.). Lorsque l'on est amené à mettre en valeur et à aménager ces ressources, on s'aperçoit vite que certaines formes d'exploitation sont complémentaires, alors que d'autres sont en concurrence. La clé d'un développement durable des moyennes et hautes terres tropicale réside en l'utilisation efficace et complémentaire des ressources naturelles pour répondre aux besoins pressants des populations, tout en perturbant le moins possible l'écosystème dans son ensemble.

Le bilan mitigé de ces dernières décennies en matière de développement des hautes terres tropicales montre que cet objectif est plus aisé à formuler qu'à atteindre. Les décideurs ont en général une bonne compréhension des principaux mécanismes de dégradation de l'environnement comme l'érosion des sols, le déboisement, la perte de biodiversité ou la pollution des eaux et de l'air. Néanmoins, ils ignorent souvent les liens de causalité entre ces mécanismes et l'impact exact de différentes politiques de développement sur chacun d'entre eux.

Les utilisateurs du SIG seront les décideurs en charge des politiques provinciales de développement et d'investissement. Les indicateurs de dégradation des terres devront répondre aux besoins et attentes spécifiques de ces responsables locaux. Une première tâche des indicateurs sera donc de synthétiser, d'interpréter et de nuancer toutes les informations acquises par le projet STD3-CT94-0310 pour les rendre directement accessibles à un public de non-spécialistes. Une seconde sera de mettre en évidence la chaîne de causalité qui unit leurs mécanismes de dégradation et de régénération pour aider les décideurs à résoudre les conflits de gestion de façon optimale.

Une troisième tâche sera de permettre aux décideurs de comparer la performance de différents ensembles administratifs. Une telle comparaison facilitera l'identification et la transposition d'initiatives couronnées de succès et évitera la duplication d'expériences malheureuses. En accord avec la complexité des processus décisionnels, une quatrième tâche des indicateurs d'environnement sera d'instaurer un dialogue étroit entre décideurs et gestionnaire de ressources naturelles pour le développement durable des moyennes et hautes terres tropicales. C'est au travers de ce dialogue que les données spécialisées acquises par le programme STD3-CT94-0310 seront portées à l'attention des décideurs et qu'un intérêt durable pour le SIG sera assuré.

Des indicateurs à un seul paramètre comme le taux de matière organique des sols ou les particules solides en suspension dans les cours d'eau exigent, pour être compréhensibles, un certain investissement technique. Ils sont aussi difficiles à corrélés à des politiques de développement ou à des décisions d'investissements précises. Ces indicateurs ne peuvent donc répondre de manière satisfaisante aux besoins et attentes des utilisateurs finaux du programme de recherche.

Dans cette perspective, le projet définira des indicateurs composites ou indices qui seront, par nature, plus directement accessibles et pertinents pour des décideurs politiques. Ces indicateurs composites joueront un rôle d'interface entre les données primaires gérées par SIG et les décideurs locaux. Par souci de simplification, la recherche sera limitée à un éventail de trois ou quatre de ces indicateurs composites. Au delà de ce nombre, il est à craindre que la profusion d'indicateurs/indices ne génère une certaine confusion et ne nuise à la lecture des résultats du programme de recherche par les utilisateurs finaux.

Afin de fournir une information adaptée aux différentes étapes de la décision et une vision dynamique de l'environnement, des indicateurs distincts seront élaborés pour décrire les pressions sur l'environnement, l'état de l'environnement et les réponses à la dégradation de l'environnement. La plupart des données collectées au travers du SIG étant disponibles à une échelle de 1/100 000, il nous sera possible de développer ces indicateurs par district. Le respect du découpage administratif facilitera la mise en relation des données socio-économiques et des données physiques ainsi que la comparaison de la

performance de différentes unités administratives.

2.3.1.2 Justesse d'analyse

Les difficultés liées à l'élaboration d'un indice de qualité des terres sont immenses du fait de la diversité et complexité des facteurs et interrelations influençant cette qualité. Pour le seul compartiment sol, la qualité d'un sol a été définie par la FAO (1993a) comme "un attribut complexe du sol qui affecte son adéquation pour des utilisations spécifiques d'une manière distincte". En ce sens, il existe non pas une mais plusieurs qualités du sol en fonction des utilisations envisagées. Un même sol pourra à la fois être propice ou totalement inadapté suivant le type d'utilisation envisagé.

Cette recherche développera donc des indices de qualité des terres s'attachant à décrire leur seule résilience aux phénomènes de dégradation et non leur adéquation à tout un ensemble d'utilisations possibles.

Un indicateur d'environnement "idéal" devrait reposer sur un consensus international quant à sa validité. Un tel consensus fait malheureusement souvent défaut. Même quand ce consensus existe et que cet indicateur idéal est immédiatement mesurable, la définition de seuils maximums tolérables de dégradation reste un exercice difficile. De la qualité de ces seuils dépendra pourtant tout l'intérêt des indicateurs d'environnement.

Les indicateurs d'environnement devront aider à un développement durable des provinces pilotes. Il ne s'agit pas de protéger systématiquement tous les écosystèmes de ces provinces, mais d'éviter que des décisions d'aménagement malheureuses ne se traduisent pas des coûts sociaux et environnementaux insupportables. Il s'agit donc d'une recherche d'optimisation des ressources humaines, environnementales et financières.

En accord avec cette approche anthropocentrée ayant pour objectif d'aider les populations des provinces pilotes à vivre et à mieux vivre au sein de leur environnement, ces seuils seront souvent établis par rapport aux meilleurs et aux plus mauvais résultats obtenus au niveau national dans un compartiment de l'environnement donné plutôt que par rapport à des valeurs souhaitables théoriques. Cette approche permettra de mettre l'accent sur des objectifs réalistes, à la portée des responsables politiques locaux. Elle est en ce sens très proche de la méthodologie adoptée par le PNUD pour l'agrégation de l'IDH de 1990 à 1994 (cf. 1.2.7.1).

2.3.1.3 Mesurabilité et informations disponibles au travers du SIG

Comme mentionné dans la section 1.1.2.1, les informations disponibles pour la gestion de l'environnement sont souvent parcellaires, et ce même dans des pays disposant d'un appareil statistique très développé. Cette absence d'information est particulièrement sévère au Viet Nam pour des raisons techniques, financières et politiques.

Dans leur rapport commun sur l'élimination de la pauvreté en 1996, le PNUD et l'UNICEF n'hésitent pas à parler de "vide informatif" au Viet Nam (*information void*), considérant l'absence d'informations fiables et détaillées comme une contrainte majeure au développement économique du pays. Ce rapport note par exemple que le Viet Nam est l'un des très rares pays au monde à ne pas publier de statistiques économiques dans "*International Financial Statistics*", la revue de référence éditée par le FMI.

Même lorsque l'information existe, de fortes questions se posent quant à sa fiabilité. Les statistiques au Viet Nam sont collectées et directement transmises par les autorités locales aux administrations centrales. En l'absence de collecte de données indépendantes, beaucoup de responsables locaux ont intérêt à gonfler ou à minimiser certains chiffres afin d'obtenir des fonds supplémentaires ou une meilleure évaluation de leur performance. De nombreuses institutions disposent aussi de monopoles informatifs, étant les seules habilitées à collecter certaines données. Ces monopoles informatifs excluent toute possibilité de vérification indépendante de la qualité des données.

L'environnement est un des domaines les plus touchés par ce vide informatif. Dans une étude pour la formulation du plan de développement du delta du Fleuve Rouge (1994), le MOSTE et le PNUD relèvent les faiblesses suivantes du système de suivi de l'environnement au Viet Nam :

1. suivi d'un nombre très limité de paramètres, et non l'ensemble des facteurs pour lesquels des normes pour l'environnement existent ;
2. inconsistance d'une année à l'autre et d'un site à l'autre entre les paramètres mesurés ;
3. absence d'informatisation des données pour faciliter l'archivage et l'analyse ;
4. duplication des tâches et absence de coordination entre les différentes institutions en charge du suivi de l'environnement ;
5. absence de mécanisme pour utiliser les résultats du système de suivi de l'environnement pour influencer la prise de décision pour le développement.

En ce qui concerne la fiabilité des mesures, l'Organisation Mondiale pour la Météorologie dans un document intitulé "*Report on a sectoral support mission to the Socialist Republic of Viet Nam*" souligne la faible qualité des données météorologiques et hydrologiques. L'absence de système de suivi de l'environnement rend extrêmement difficile la définition des problèmes et des causes de dégradation de l'environnement, la détermination des priorités, et la conception et l'évaluation des différentes stratégies possibles pour résoudre ces problèmes.

Cette absence de système de suivi entraîne aussi paradoxalement des coûts de collecte de l'information extrêmement élevés. De nombreuses études sont conduites chaque année pour palier à ce vide informatif et permettre la formulation de programmes spécifiques. Ces données collectées de manière *ad hoc* sont rarement archivées; de nouvelles études seront ainsi requises et financées pour acquérir à nouveau les mêmes données. Les équipements achetés et l'expertise développée pour la mise en œuvre de chacun de ces programmes de collecte de données sont rarement réutilisés.

Plus qu'un problème d'expertise ou de moyens financiers, le vide informatif trouve ses racines dans les attitudes institutionnelles des décideurs. Rappelant que le secteur public continue à jouer un rôle dominant dans l'allocation des ressources au Viet Nam, le PNUD et l'UNICEF soulignent qu'un changement fondamental de la culture de l'information est nécessaire pour permettre une meilleure prise de décision et une plus grande qualité des investissements publics : "*Doing so will require a fundamental change in culture and attitudes towards sharing information, as well as training of more people in surveying, accounting, auditing and electronic information management systems*".

Il va de soit que ce problème se révélera particulièrement contraignant pour l'objet de notre étude. En accord avec notre critère de mesurabilité, les données nécessaires pour construire les indicateurs d'environnement devront être immédiatement disponibles au travers du SIG ou être accessibles à un coût-bénéfice raisonnable pour l'ensemble des moyennes et hautes terres du Viet Nam. Développer un programme spécifique de collecte de données ne sera pas une option. De ce fait, il nous faudra souvent avoir recours à un indicateur de remplacement, quand l'indicateur "idéal" ne sera pas immédiatement mesurable.

Nous aurons aussi soin de construire les indicateurs d'environnement à partir de données officielles ne prêtant ni à controverse ni à interprétation. Un objectif clef de ces indicateurs est de faciliter un dialogue entre décideurs et gestionnaires des ressources naturelles, pas d'engager un débat sur la validité des statistiques provinciales. Pour évaluer les réponses à la dégradation de l'environnement, nous éviterons ainsi des indicateurs difficiles à interpréter comme la réforme agraire, les politiques tarifaires ou le pourcentage de surfaces forestières effectivement protégées. Par exemple, la redistribution des terrains forestiers aux communautés peut soit freiner soit aggraver le déboisement, selon la manière dont cette redistribution est conduite (J. Carle, 1996). En l'absence d'information précise sur les modalités de cette redistribution, nous sélectionnerons un indicateur de réponse au déboisement plus aisément interprétable.

2.3.2 Sélection d'indicateurs de dégradation des terres

Plusieurs organismes et groupes de travail internationaux s'attachent depuis plusieurs années à développer des indicateurs de qualité des terres. Pour nous aider dans notre recherche, nous comparerons les indicateurs ainsi proposés par l'OCDE, la Commission des Nations Unies pour le Développement Durable (UNCSD), la Banque Mondiale et le Groupe de travail international pour la définition d'indicateurs de qualité des terres pour un développement durable des ressources Naturelles (LQI)⁷.

2.3.2.1 Indicateurs de dégradation des forêts

Le tableau 16 compare les différents indicateurs de dégradation des forêts proposés par l'OCDE, la UNCSD, la Banque Mondiale et le Groupe de Travail LQI.

Tableau 16 - Tableau comparatif de différents indicateurs de dégradation des forêts

Indicateurs de dégradation des forêts	Pression	État	Réponse
OCDE	Récolte réelle/capacité de production	Superficie, volume et structure des forêts	Gestion et protection des forêts
UNCSD	Intensité des récoltes	Variation des Superficies forestières	% des forêts gérées % forêts protégées
Banque Mondiale	Variation de l'occupation des sols	Superficie, volume et structure des forêts Valeur commerciale des forêts	Récolte réelle/capacité de production Utilisateurs principaux taux de recyclage
LQI (dégradation de la forêt et déboisement de l'agriculture)	Récolte réelle/capacité de production Coupe de bois illégales dans les forêts Pénurie en bois, comme indiquée par des prix élevés Déboisement observé pour la mise en culture Rapport terres cultivées/terres cultivables	% forêts dégradées % de réduction du couvert forestier	Adoption de l'agro-foresterie Participation accrue des populations à la protection et gestion des forêts Législation pour protéger la forêt, et efficacité de son application Campagnes d'éducation des populations Taux de reboisement

En accord avec le consensus qui semble se dégager de cette comparaison, le tableau 17 donne les indicateurs de dégradation des forêts proposés pour les hautes terres du Viet Nam.

⁷ Le Groupe de Travail International pour la définition d'Indicateurs de Qualité des Terres pour un Développement Durable des Ressources Naturelles (IQT), formé en 1995, est mené par la Banque Mondiale, la FAO, le PNUE et le PNUD (Pieri, Dumanski, Hamblin, Young, 1995).

Tableau 17 - Indicateurs de dégradation des forêts pour les hautes terres du Viet Nam

Indicateurs de dégradation des forêts	Pression	État	Réponse
Dégradation des forêts	Variation de l'occupation des sols	Superficie, densité, et forme des forêts	Taux de reboisement par plantations et d'aforestation par régénération naturelle

Les forêts conservées constituent les plus riches habitats naturels en termes de biodiversité terrestre. Elles ont aussi un fort pouvoir de conservation du sol et de l'eau. Elles protègent les sols contre l'impact des gouttes de pluie et ralentissent les filets d'eau, leur donnant le temps de s'infiltrer. Par opposition, une plantation récente à base d'eucalyptus ou autres espèces exotiques à pousse rapide n'offrira qu'une faible couverture au sol et n'améliorera que très faiblement l'infiltration de l'eau.

Le Viet Nam a entrepris un programme ambitieux de reboisement à partir d'un nombre très limité d'espèces d'arbres. L'impact de ce programme de reboisement sur l'environnement risque d'être marginal si la superficie des forêts conservées ne cesse en même temps de se réduire.

Le concept de qualité des forêts n'a été popularisé que très récemment au Viet Nam. Pendant longtemps, le terme de développement durable des ressources forestières était entendu dans le sens d'un approvisionnement durable en bois des industries forestières. Cette approche volumétrique est clairement reflétée par la priorité donnée au développement des industries forestières dans le Plan d'Action Tropical Forestier du Viet Nam (Ministère des Forêts, 1988) et dans les cartes de l'état des forêts publiées par le FIPI (*Forest Inventory and Planning Institute*).

Les mesures de biodiversité et leurs interprétations ont fait l'objet de très forts débats au cours des cinq dernières décennies, sans qu'un clair consensus se soit dégagé (W. Reid, J. Mc Neely, D. Tunstall, A. Bryant et M. Winograd, 1993). En l'absence d'un indicateur global et consensuel de diversité biologique, les indicateurs de dégradation des forêts retenus pour les hautes terres du Viet Nam devront permettre d'appréhender tant les aspects de qualité que ceux du volume forestier. Notre analyse de la variation et de l'état du couvert forestier ne portera donc que sur les forêts peu ou pas perturbées, les seules à même de conserver une biodiversité importante.

2.3.2.2 Indicateurs de dégradation des sols

Un des objectifs majeurs du programme STD est d'évaluer avec plus de précision l'importance de la dégradation des sols dans les hautes terres du Viet Nam. En sus de l'érosion, la littérature existante signale des phénomènes importants de dégradation physique des sols par compactage et de dégradation chimique par pertes d'éléments nutritifs dans les plaines de Thai Nguyen (Eimberck, Hardy, Jamagne, 1987). De plus amples recherches seront néanmoins nécessaires pour identifier avec précision les mécanismes de dégradation chimique mis en jeu.

Ces recherches dépassent le cadre cette étude. Nous nous concentrerons donc sur les mécanismes d'érosion des sols et leurs liens de causalité avec le déboisement et la dégradation des eaux. Une seule description des phénomènes d'érosion pourrait néanmoins donner à penser que les phénomènes de dégradation des sols sans entraînement de terres sont d'une importance secondaire à Thai Nguyen. Pour éviter une telle méprise, nous présenterons dans notre étude finale à la fois une carte d'état d'érosion des sols et une carte d'état de dégradation des sols sans entraînement de terre à Thai Nguyen.

Le tableau 18 compare les différents indicateurs de dégradation des sols proposés par l'OCDE, la UNCSD, la Banque Mondiale et le Groupe de Travail LQI.

Tableau 18 - Tableau comparatif de différents indicateurs d'érosion des sols

Indicateurs de dégradation des sols	Pression	État	Réponse
OCDE (désertification et érosion)	Risques d'érosion : utilisation potentielle et réelle du sol pour l'agriculture ; changements dans l'utilisation des sols	Taux de perte de la couche arable	Zones réhabilitées
UNCSD
Banque Mondiale	Dégradation d'origine anthropique	Classification des sols
LQI (érosion hydrique et déclin de la fertilité des sols)	Superficie des terrains en pente cultivés sans mesures adéquates de conservation des sols	Taux d'érosion (t/ha/an), obtenu par mesure de terrain ou modélisation ; signes visibles d'érosion	Étendue des pratiques de conservation des sols ; nombre d'associations paysannes actives dans la conservation des sols ; abandon de terres anciennement cultivées

Les indicateurs de l'OCDE en matière d'érosion des sols semblent les mieux adaptés aux phénomènes de dégradation rencontrés dans les provinces pilotes. L'éventail des indicateurs de dégradation des sols retenu par les hautes terres du Viet Nam est donné, comme suit :

Tableau 19 - Indicateur de dégradation des sols pour les hautes terres du Viet Nam

Indicateur	Pression	État	Réponse
Érosion des sols	Risques d'érosion des sols, obtenus par modélisation SIG	Taux d'érosion (t/ha/an), obtenu par inventaire des signes visibles d'érosion	Étendue des pratiques de conservation des sols

2.3.2.3 Indicateurs de dégradation des eaux

Le tableau 20 compare les différents indicateurs de dégradation des ressources en eau proposés par l'OCDE, la UNCSD, la Banque Mondiale et le Groupe de Travail LQI.

Tableau 20 - Tableau comparatif de différents indicateurs de dégradation des eaux

Indicateurs de dégradation des eaux	Pression	État	Réponse
OCDE (ressources en eau et eutrophisation)	Intensité d'utilisation des ressources en eau. Rejets de N et de P dans les cours d'eau	Fréquence, durée et étendue des périodes de pénurie d'eau DBO/OD, concentration en N et en P dans les eaux intérieures et les eaux marines	Tarifcation de l'eau et redevances pour l'épuration des eaux usées ; % de la population raccordée à une station d'épuration biologique et/ou chimique des eaux usées; part de marché des détergents sans phosphates
UNCSD	Prélèvements annuels des eaux souterraines et de surface. Consommation domestique <i>per capita</i>	Réserves en eaux souterraines; concentration en coliformes fécaux des eaux douces; demande biologique des cours d'eaux	Taux de traitement des eaux usées; densité des réseaux hydrologiques
Banque Mondiale	Intensité d'utilisation des ressources en eau	Accessibilité pour la population	Adoption de pratiques de conservation de l'eau
LQI (abaissement de la nappe d'eau souterraine et/ou salinisation)	Besoins en eau agricole excédant la capacité de recharge naturelle des eaux souterraines	Abaissement des nappes phréatiques Echecs culturels dus aux pénuries en eau ou à la salinisation des sols	Mise en œuvre de pratiques d'irrigation améliorées, mise en œuvre de travaux de restauration des sols ; développement de cultures tolérantes aux sels ; abandon de terres agricoles du fait de leur salinisation ou hydromorphie ; tendances en matière de dépenses pour la maintenance des canaux de distribution

Du fait de la forte variabilité saisonnière des précipitations et du régime hydrologique au Viet Nam, des phénomènes temporaires mais critiques de pénuries en eau se rencontrent dans les moyennes et hautes terres du Viet Nam. Les indicateurs de dégradation des eaux devront donc porter à la fois sur la disponibilité des ressources et la pollution de l'eau à Thai Nguyen. Le programme STD3 - CT94-0310 retiendra donc les deux séries d'indicateurs de dégradation de l'eau données au tableau 21.

Tableau 21 - Indicateurs de dégradation des eaux pour les hautes terres du Viet Nam

Indicateurs de suivi de la ressource en eau	Pression	État	Réponse
Pénurie en eau	Intensité d'utilisation de la ressource en eau	Fréquence, durée et étendue des périodes de pénurie d'eau	Adoption de pratiques de conservation de l'eau
Pollution de l'eau	Émissions de rejets polluants	Concentration en polluants	Investissements en services et programmes de réduction des émissions polluantes

2.3.2.4 Interface SIG/ Indicateurs de dégradation des terres

L'ensemble des indicateurs de dégradation des terres proposés pour les hautes terres du Viet Nam est donné au tableau 22.

Tableau 22 - Indicateurs de dégradation des terres pour les hautes terres du Viet Nam

Indicateurs d'environnement	Pression	État	Réponse
Dégradation des forêts naturelles	Variation de l'occupation des sols	Superficie, densité, et forme des forêts naturelles	Taux de reboisement par plantation et aforestation par régénération naturelle
Érosion des sols	Risques d'érosion des sols, obtenus par Modélisation SIG	Taux d'érosion (t/ha/an), évalué à partir de l'inventaire des signes visibles d'érosion	Étendue des pratiques de conservation des sols
Pénurie en eau	Intensité d'utilisation de la ressource en eau	Fréquence, durée et étendue des périodes de pénurie d'eau	Adoption de pratiques de conservation de l'eau
Pollution de l'eau	Émissions de rejets Polluants	Concentration en polluants	Investissements en services et programmes de réduction des émissions polluantes

III AGRÉGATION DES INDICATEURS DE DÉGRADATION DES TERRES

L'objet de cette troisième partie est de présenter les méthodologies d'agrégation retenues pour la construction des différents indicateurs d'environnement. Les résultats fournis par ces indicateurs seront analysés en quatrième partie de ce document.

3.1 ÉLABORATION D'UN INDICE DE DÉGRADATION DES FORÊTS ET DE PERTE DE BIODIVERSITÉ

La carte de la végétation de Thai Nguyen répertorie seize types de formations forestières et arbustives (voir carte 5). Les forêts naturelles denses et ouvertes (*open forests*) peu ou pas perturbées abritent la majorité de la biodiversité restante de la province. Comme indiqué en 2.3.2.1, notre analyse de la dégradation des forêts et de la perte de biodiversité ne portera que sur ces seules formations forestières.

3.1.1 Agrégation d'un indice de risque de dégradation des forêts

3.1.1.1 Les principales causes de dégradation des forêts dans les hautes terres du Viet Nam

Le couvert forestier du Viet Nam aurait diminué de 67 % du territoire à 29 % entre 1943 et 1991. De 1991 à 1995, la superficie forestière totale semble s'être légèrement accrue (voir tableau 23).

Tableau 23 - Variation du couvert forestier au Vietnam de 1976 à 1995 (hectares x 1000)

Types de forêts	1976	1980	1985	1990	1995
Forêts naturelles	11 107,7	10 186,0	9 308,3	8 430,7	8 252,5
Forêts replantées	92,6	422,3	583,6	744,9	1 049,7
Superficie forestière totale	11 169,3	10 608,3	9 891,9	9 175,6	9 302,2

Source: Rapport sur le reboisement au Viet Nam 1976-1995, reproduit par MPI/UNDP-1997.

Certains auteurs recommandent une grande prudence dans l'interprétation de ce récent accroissement du couvert forestier du fait des distorsions statistiques entraînées par la modification des critères de définition d'une forêt au milieu des années 80 (Banque Mondiale, 1995)⁸. De plus, la très forte augmentation des superficies en forêts replantées masque une réduction continue des forêts naturelles. Des écosystèmes d'une richesse biologique inestimable sont aujourd'hui remplacés par des monocultures forestières de valeur biologique et hydrologique réduite. Le Ba Thao (1999), Président de l'Association des Géographes du Viet Nam, dresse le constat suivant :

« La vitesse actuelle de reboisement ne peut tout au plus que compenser les superficies de forêts déboisées ou brûlées pour en faire des essarts, avec cette différence qu'on plante des arbustes alors que l'on abat surtout de grands arbres ».

Les causes directes de dégradation de la forêt dans les hautes terres du Viet Nam comprennent : (i) les défrichements agricoles mis en œuvre par les migrants ; (ii) l'agriculture récurrente ; (iii) les feux de forêts spontanés ; (iv) l'exploitation commerciale extractive du bois ; (v) la collecte du bois de chauffage ; (vi) les insectes, rongeurs et maladies ; (vii) le développement des infrastructures rurales ; (viii) les exploitations minières ; et (ix) les dégradations dues aux conflits militaires. Le tableau 24 présente une estimation de l'importance relative de chacune de ces causes dans la dégradation des forêts au Viet Nam. Une description détaillée de ces différentes causes directes est donnée en annexe VI.

⁸ En accord avec les nouvelles définitions de la FAO, le pourcentage de canopée nécessaire pour justifier l'appellation de forêt naturelle fut réduit de 30 à 10 %.

Tableau 24 - Causes de déforestation/déboisement et superficies concernées annuellement (en hectares x 1 000)

Régions	Feux de forêts (1990)	Agriculture récurrente (1991)	Bois de feu (1992)	Exploitation commerciale (1991)	Total sans le bois de feu
Montagnes du nord	0	35	115	17	52
Collines du nord	0	10	11	23	33
Delta du Fleuve rouge	0	0	33	5	5
Côte centre nord	1	7	96	4	12
Côte centre sud	0	15	46	4	19
Hautes terres du centre	4	95	69	8	107
Mékong nord-est	2	15	78	4	21
Delta du Mékong	11	3	32	13	27
Total	18	180	480	78	276

Source: FIPI 1990, TFAP 1991. Estimations de la Banque Mondiale 1992 (Banque Mondiale, 1995).

En l'absence d'un système d'information forestier fiable au Viet Nam, il convient de garder à l'esprit l'incertitude associée à ces estimations. À titre d'illustration, l'encadré 4 reproduit les théories souvent contradictoires avancées par différentes organisations et experts quant à l'importance relative de ces différentes causes directes de dégradation des forêts au Viet Nam (IIED, 1998).

Les différentes théories mentionnées dans l'encadré 4 ne font généralement pas de distinction entre les causes fondamentales de la déforestation (démographie, pauvreté, accessibilité, systèmes fonciers, etc.) et les causes directes (défriche agricole, exploitation extractive du bois, agriculture récurrente, etc.). Une telle distinction se révélera importante pour l'analyse des résultats des indicateurs de dégradation des forêts dans la suite de ce document.

3.1.1.2 Agrégation d'un indice de pression sur les forêts pour les hautes terres du Viet Nam

L'indicateur de pression sur les forêts devrait permettre d'estimer le poids conjugué de ces différentes forces. Un consensus semble exister sur l'adéquation de la variation de l'occupation des sols pour refléter ces pressions conjuguées. Elle permet en effet de communiquer immédiatement sous forme visuelle l'étendue et la progression du déboisement. Les cartes de l'occupation des sols et de la végétation du programme STD3-CT94-0310 furent développées à partir d'une image Landsat d'octobre 1994. Le SIG n'incorpore pas encore de données historiques pour une analyse de la variation de l'occupation des sols et du couvert forestier ; ceci est dû au fait que certains documents n'ont pas été mis à la disposition du projet, les photos aériennes en particulier.

Nous aurons donc recours, pour la construction de cet indicateur de pression sur les ressources forestières à trois cartes de végétation fournies par le FIPI (*Forest Inventory and Planning Institute*) du Vietnam pour les périodes 1943, 1983 et 1993. En comparant ces trois séries de données, nous estimerons la variation du couvert en forêts denses et ouvertes au cours des 50 dernières années. Les données pour ces trois périodes étant disponibles au niveau national, cette méthodologie pourra être étendue à l'ensemble des moyennes et hautes terres du Viet Nam.

Il convient de souligner dès à présent les fortes incertitudes qui se posent quant à la validité de la carte de végétation de 1943 fournie par le FIPI. Cette carte, numérisée et produite par le FIPI, est basée sur la « Carte de l'Indochine forestière » au 1/2 000 000 réalisée par Paul Maurand et datée de 1943. Avant le développement de la photographie aérienne, les inventaires forestiers ont souvent été une opération de projection plus ou moins arbitraire de relevés locaux, plus ou moins précis sur de vastes étendues qui n'ont jamais été réellement recensées. Comme souligné par F. Thomas dans son récent ouvrage sur l'histoire du régime et des services forestiers français en Indochine de 1862 à 1945, le manque de moyens financiers et l'insuffisance du personnel forestier de l'époque n'ont certainement pas permis à P. Maurand qu'il en fut autrement.

Encadré 4 : Les principales causes du déboisement au Viet Nam : théories et contradictions

Les interprétations suivantes des causes majeures du déboisement au Viet Nam peuvent être rencontrées :

- “Les trois quarts des pratiques de déboisement destructives peuvent être attribuées aux populations qui ont été relocalisées dans les nouvelles zones économiques”. Nguyen Van Thang (cité par Buffett, 1997).
- “Alors que les guerres, les changements de politiques de développement et l'introduction de nouvelles technologies ont tous été associés au déclin régulier des forêts naturelles du Viet Nam, l'accroissement démographique est sans doute la cause fondamentale de la déforestation» Poffenberger et Nguyen Huy Phon dans Poffenberger (1998). Par contre, Boyce (1990, dans Buffett, 1997) souligne qu’“identifier la population comme l'origine fondamentale du problème est confondre un symptôme et une cause”.
- Une étude de faisabilité de la Banque Asiatique de Développement (1996) débute sur cette déclaration : “Les forêts au Viet Nam sont détruites à un rythme rapide dû à l'exploitation commerciale extractive du bois et à l'agriculture récurrente⁹».
- “Les effets directs et indirects de la guerre sont aussi à blâmer pour la perte du couvert forestier: en sus des effets de la guerre (bombardements et défoliants), une exploitation extractive de la forêt a été menée dans certaines régions des hautes terres pour générer les revenus financiers nécessaires à l'effort de guerre. La production de billes de bois continua à dominer les politiques forestières jusqu'à la fin des années 80 alors que le pays essayait de réanimer son économie après la guerre” (Poffenberger et al, 1997).
- Le PNUD (dans Buffett, 1997) estime que “50 % des 200 000 hectares de forêts perdus chaque année sont dus à la collecte de bois de feu et à l'exploitation commerciale extractive du bois, 25 % aux défrichements agricoles et 25 % aux feux de forêts”.
- L'Institut des Sciences de la Forêt du Viet Nam identifie cinq causes majeures de déboisement : “Exploitation commerciale, agriculture récurrente, défriche agricole, agent orange pendant la guerre (responsable de la perte de 2 millions d'hectares) et les feux de forêts».
- “D'autres paramètres comme les systèmes fonciers, les voies d'accès ouvertes par les routes à des forêts jusqu'alors protégées par leur isolement, l'accès à des technologies comme la tronçonneuse, le développement des cultures commerciales¹⁰, les politiques fiscales, les subventions, etc. sont aussi fréquemment mentionnés”.
- La plupart des documents officiels soulignent le rôle de la croissance démographique et de l'agriculture récurrente. Se référant au *Rainforest Action Network* (1992) et à d'autres auteurs, Swartzendruber (1994) suggère que “cette fixation sur l'agriculture récurrente pourrait n'être qu'un effort pour détourner l'attention du rôle joué par les forces politiques et financières dans la dégradation de l'environnement au travers de l'exploitation commerciale extractive du bois” et attribue une grande partie de la responsabilité aux “agences gouvernementales qui distribuent les concessions forestières”.

Un autre point d'une importance cruciale pour notre étude du recul forestier à Thai Nguyen concerne la datation de la carte Maurand. Nous reproduisons ici l'analyse faite par F. Thomas (1999) à ce sujet :

«**L'Indochine forestière**» est publiée en 1943, mais Maurand fait paraître un article également intitulé «**L'Indochine forestière**» dans le **Bulletin Economique de l'Indochine** en 1938 à la fin duquel se trouve la même carte forestière avec pour seules modifications les frontières des provinces

⁹ Le terme anglais de « shifting cultivation » peut définir soit une agriculture itinérante soit une agriculture récurrente suivant le contexte. À l'exception de quelques pratiques très localisées, l'agriculture récurrente est la principale forme d'agriculture sur brûlis rencontrée au Viet Nam

¹⁰ L'extension des cultures dites industrielles telles que le café, le poivrier et l'hévéa est rarement mentionnée comme une cause majeure du déboisement au Viet Nam. Les travaux du programme STD3-CT94-0310 semblent pourtant confirmer l'importance de ce facteur dans le déboisement des provinces pilotes, et en particulier dans celui de la province de Lam Dong (P. Brabant, communication personnelle. 1999).

cambodgiennes et laotiennes perdues par la France dans son conflit avec la Thaïlande en 1941. La carte de 1943 est en fait celle des forêts d'Indochine de 1938. Plus encore cet article du Bulletin Economique de l'Indochine est la publication d'un rapport fait au septième Congrès International d'agriculture tropical et subtropical, qui se tenait à Paris en 1937. Nous ne saurions dire si à l'occasion de ce rapport Paul Maurand disposait déjà de cette carte. Pour finir nous avons découvert récemment dans les archives de Hô Chi Minh-Ville, une série de cartes forestières publiées par le Service Géographique de l'Indochine entre 1930 et 1932. Ces cartes sont celles qui ont servi de modèle à Maurand pour établir sa carte forestière de toute l'Indochine».

De prochains travaux de F. Thomas devraient confirmer que la carte forestière de Maurand datée de 1943 - et que tous les forestiers utilisent aujourd'hui comme référence de l'état de la couverture végétale à la fin de colonisation – date en vérité de 1930. Il est évident que cette confirmation changerait de façon importante la perspective du recul forestier de Thai Nguyen brossé dans la suite de cet ouvrage.

Le but de cette analyse du recul forestier de Thai Nguyen est donc de donner seulement une meilleure idée de la pression sur le couvert forestier de la province au cours des cinquante dernières années sans prétendre à la rigueur. A cette fin, nous calculerons le pourcentage de réduction du couvert forestier pour chaque district au cours des cinquante dernières années à partir de la fonction «union» (geoprocessing) de Arc View. Nous adopterons ensuite une discrétisation en cinq classes de pression de ce pourcentage à partir de la méthode des seuils naturels.

Le pourcentage de déforestation sera obtenu à partir de l'équation suivante :

$$i = n \sqrt{\frac{S_p}{S_m - 1}}$$

Avec :

- i = Taux annuel de déforestation de l'année m à l'année p.
- S_m = Superficie du couvert forestier à l'année m.
- S_p = Superficie du couvert forestier à l'année p.
- N = Durée de la période de m à p en année.

Ce pourcentage sera comparé à la moyenne nationale de déforestation de 1.6 % par an enregistrée de 1943 à 1991. Sur la base de cette moyenne, cinq classes de pression sur la forêt seront retenues de 1 (très faible) à 5 (très forte) :

Tableau 25 - Détermination des classes de pression sur la forêt

Pourcentage annuel de déforestation	Classe de pression	Qualificatif de la classe
< 1	1	Très faible
1 – 1.5	2	Faible
1.5 – 2	3	Moyenne
2 – 2.5	4	Forte
>2.5	5	Très forte

Les données brutes relatives à la variation du couvert forestier ne renseignent pas sur l'importance respective des différents mécanismes de dégradation de la forêt. Il existe une grande diversité d'opinions et très peu de données précises sur les causes fondamentales de cette dégradation. Compte tenu de l'importance de cette question pour la définition des politiques de développement rural, nous nous efforcerons de mener à bien une première analyse des causes fondamentales de la variation du couvert forestier à Thai Nguyen. À l'aide des fonctions de croisement du SIG, nous essayerons de modéliser l'impact des facteurs suivants : (i) la topographie et le réseau routier ; (ii) la densité de la population ; et (iii) le type de végétation et de sol.

3.1.2 Agrégation d'un indice d'état des forêts

3.1.2.1 Importance de la dimension et de la forme dans l'état de dégradation d'une forêt

La représentation des superficies en forêts denses et ouvertes donnée carte 5 ne traduit que partiellement l'état de dégradation réel des formations forestières restantes dans la province de Thai Nguyen. Cette représentation cartographique visualise la distribution spatiale et la densité des fragments forestiers mais ne donne qu'une impression superficielle de leur dimension et de leur forme.

La dimension et la forme des fragments forestiers ont une influence directe sur leur résistance aux mécanismes de déforestation. La capacité de régénération d'une formation forestière après des défrichements ponctuels sera directement proportionnelle à sa dimension. La dimension sera aussi d'une importance capitale pour la conservation de la biodiversité. Un fragment forestier de 10 000 hectares offrira une bien meilleure protection pour la biodiversité que dix fragments disjoints de 1 000 hectares.

Bien que d'une importance prépondérante, la dimension ne peut seule refléter pleinement le degré de résistance physique d'une forêt à la dégradation. Deux fragments forestiers de dimensions identiques mais de formes différentes résisteront différemment aux mécanismes de déforestation. Un fragment forestier compact résistera plus aisément à des phénomènes d'érosion en lisière qu'un fragment fortement dentelé. Une réduction de 10 % du couvert forestier dans le cas d'une forêt compacte réduira le périmètre forestier total mais n'en modifiera pas l'unité. Une forêt fortement dentelée subissant une déforestation de même ampleur se morcellera par contre en plusieurs fragments de taille plus réduite et donc de fragilité accrue. La figure 17 illustre graphiquement ce point.

3.1.2.2 Détermination de la dimension et de la forme des formations forestières

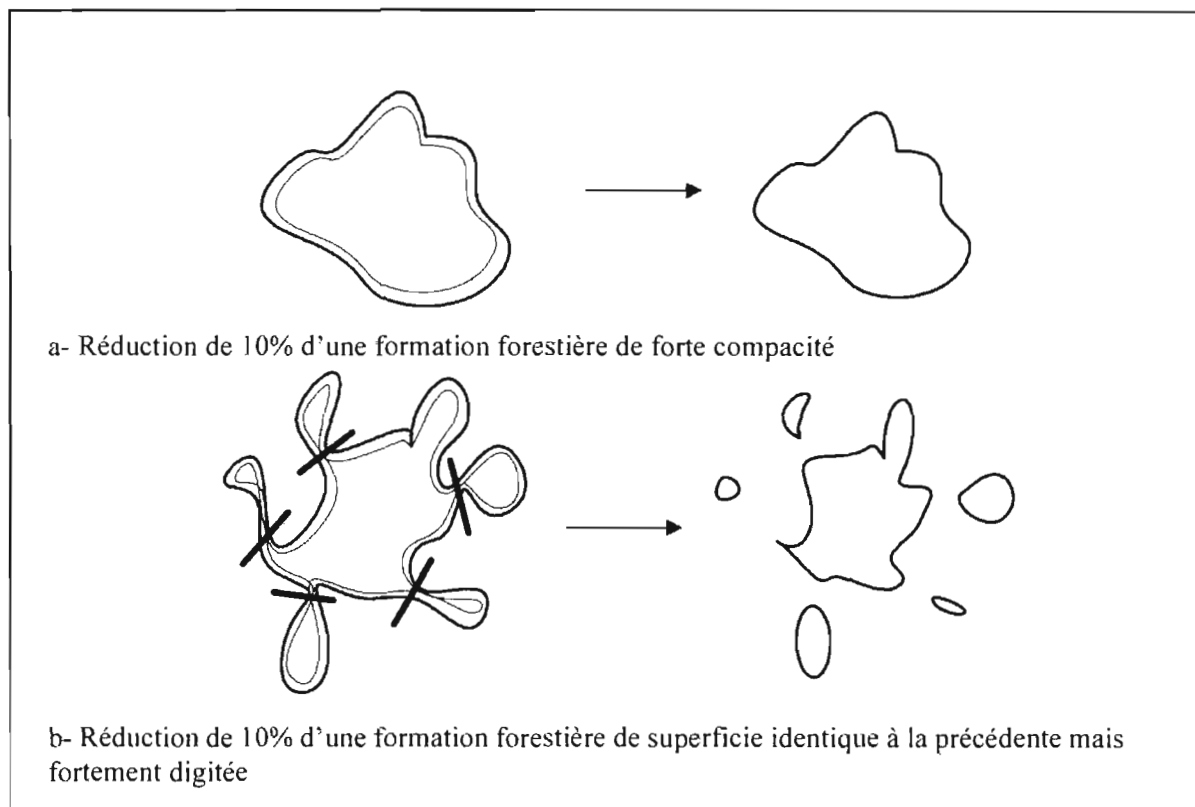
Afin de refléter de façon plus précise l'état réel de dégradation des forêts restantes à Thai Nguyen, l'indice d'état de dégradation de la forêt décrira à la fois la distribution spatiale, la densité, la dimension et la forme des différents fragments forestiers. Dans cet objectif, nous nous inspirerons d'une méthodologie développée par Thomas Bouix pour le projet STD3-CT94-0310 à l'occasion d'un stage de DEA (T. Bouix, 1998). Nous modifierons toutefois les classes, les seuils et les équations d'agrégation initialement adoptées dans cette première étude pour analyser de façon plus précise les formations forestières de petite dimension et donner un plus grand poids au facteur «forme». Les formations forestières de petite dimension jouent un rôle d'indicateur de déforestation très important. Alors que les variations de superficie de formations de grande dimension seront difficiles à déceler, un suivi des petites formations permettra d'évaluer immédiatement l'impact des politiques de protection de la forêt.

La dimension est ici définie comme l'aire d'un fragment forestier d'un type de forêt donné. En accord avec l'approche générale de cette étude pour la détermination des seuils, les classes d'état de dégradation pour la dimension des fragments forestiers ne seront pas fixées en fonction d'une valeur minimum théorique mais suivant la valeur relative des fragments forestiers individuels par rapport à l'ensemble de la superficie forestière de la province. Les différentes formations forestières de Thai Nguyen seront ainsi regroupées en cinq classes à partir de la méthode des seuils naturels¹¹

En complément de cette analyse de la dimension, nous déterminerons un indicateur de forme. Une revue bibliographique (T. Bouix, 1998) fait apparaître un consensus quant au rapport périmètre/aire pour décrire la forme des fragments. Pour les besoins de cette étude, nous reprendrons l'équation de compacité développée par Jorge et Garcia sur la base de ce rapport périmètre/aire.

¹¹ Les seuils représentent de soudaines et fortes variations dans une série de valeurs. Cette méthode permet de minimiser les variations de valeurs à l'intérieur d'une même classe. *Using Arcview GIS*. 1996. *Environmental Systems Research Institute*, p. 104.

Figure 17 : Importance de la compacité dans la résistance des formations forestières à la dégradation



Cet indicateur de compacité mesure le rapport entre les rayons théoriques du périmètre et de l'aire d'un fragment forestier, si ce fragment était un cercle, comme suit :

$$A = \pi * r_A^2$$

Avec :

A = Aire du fragment forestier étudié.

r_A = Rayon théorique du fragment pour un cercle d'aire égale.

$$P = 2\pi * r_P$$

P

Avec :

= Périmètre du fragment forestier étudié.

r_P

= Rayon théorique du fragment pour un cercle de périmètre égal.

$$C = r_A / r_P$$

$$= \sqrt{(A/\pi) / P / 20}$$

$$= (2 * \pi * \sqrt{(A/\pi)}) / P$$

Avec :

C = Compacité. Dans le cas d'un cercle, ce rapport sera égal à 1. Plus la forme d'un fragment forestier est compacte (proche du cercle), plus c est proche de 1. Plus la forme d'un fragment forestier est digitée, plus c tend vers 0.

Dans le cas de fragments de petites dimensions, la valeur de la compacité peut être faussée par un artefact dû à la précision du dessin durant la réalisation de la carte ou sa numérisation. Il est donc plus prudent de fixer un seuil de dimension des fragments forestiers pour le calcul de compacité, en dessous duquel les fragments seront considérés comme très fragiles indépendamment de leur forme. Dans cette optique, nous ne calculerons l'indice de compacité que pour les fragments supérieurs à la première classe de dimension définie lors de l'analyse de dimension précédemment décrite.

Les fragments supérieurs à ce seuil seront repartis en cinq classes de compacité selon la même méthode de seuils naturels. La compacité aura tendance à augmenter avec la réduction de dimension. L'indice de compacité réduira donc l'importance du facteur dimension dans l'estimation de l'état de dégradation des forêts. Afin de pleinement refléter la prépondérance de la dimension par rapport à la forme dans le calcul de l'indice d'état de dégradation des forêts, nous adopterons l'équation d'agrégation suivante¹² :

$$EDF = [3x(ID) + (IC)]/4$$

Où :

EDF = Etat de fragilité de la forêt variant de 1 (très faible dégradation) à 5 (très forte dégradation).

ID = Indicateur de dimension, variant de 1 (très forte dimension) à 5 (très faible dimension).

IC = Indicateur de compacité, variant de 1 (très faible compacité) à 5 (très forte compacité).

Une valeur d'état de dégradation de la forêt de 5 (très fort) sera automatiquement attribuée aux fragments forestiers de taille 5.

Le Gouvernement vietnamien a pour objectif de maintenir un couvert forestier sur plus de la moitié de son territoire. Nous déterminerons l'indice d'état de dégradation des forêts par rapport à cet objectif. Afin de pleinement refléter l'état de la forêt en fonction des quatre paramètres de densité, de distribution spatiale, de dimension et de forme, nous ne retiendrons pour ce calcul que les superficies forestières de fragilité très faible à moyenne.

Tableau 26 - Détermination de l'indice d'état de dégradation des forêts

Pourcentage de la superficie totale sous couvert forestier de fragilité très faible à moyenne	Indice d'état de dégradation des forêts	Qualification de l'état
> 40	1	Très faible
30-40	2	Faible
20-30	3	Moyen
10-20	4	Fort
10<	5	Très fort

Les forêts non perturbées restantes couvrent moins de 8 % de la superficie de la province. Il est clair que le couvert forestier de Thai Nguyen est très dégradé, quelque soit la définition adoptée. Le principal objet de l'indice d'état de dégradation de la forêt sera donc de distinguer la fragilité relative des différentes formations forestières restantes afin de mieux cibler les efforts provinciaux de protection de la forêt.

3.1.3 Agrégation d'un indice de réponse à la dégradation des forêts

L'indicateur de réponse à la dégradation des ressources forestières devrait refléter autant que possible l'efficacité des politiques de protection de la forêt mises en œuvre dans les hautes terres du Viet Nam.

Le FIPI considère comme "terres forestières" tous les sols ayant une pente de plus de 25 degrés, quelque soit actuellement le couvert réel de ces terrains (FAO, 1996). Le FIPI estime ainsi la superficie forestière totale du Viet Nam (*Dat lam nghiep* ou terres forestières) à 19.1 millions d'hectares¹²

Les priorités du Viet Nam en matière de développement du secteur forestier peuvent être résumées comme suit (UNDP/FAO, 1996) :

¹² Trois classifications différentes des terres ont été réalisées : (1) par le Département Général d'Administration des Terres (GDLA), (2) par l'Institut de Planification et d'Inventaire Forestier (FIPI), (3) par l'Institut National de Planification et de Prévision agricole (NIAPP). Du fait des critères différents de classification adoptés, de fortes divergences existent dans leur recensement respectif du couvert forestier. A la différence du FIPI, le GDLA estime la superficie forestière totale du Viet Nam à 9.3 millions et le NIAPP à 15.2 millions.

1. Désignation de 6 millions hectares comme «forêt de protection» (*Phong ho*) pour la conservation des sols, de l'eau et de la biodiversité.
2. Désignation de 3 millions d'hectares comme forêts à usages réservés (*Dac dung*) (parcs nationaux, conservatoires culturels, etc.).
3. Désignation de 10 millions d'hectares pour l'exploitation commerciale du bois (*San xuat*).
4. Mobilisation d'un million de foyers pour le développement de l'agro-foresterie.
5. Promotion de plantations dispersées d'arbres près des lieux d'habitations et des jardins particuliers.

En accord avec ces objectifs, la classification suivante des "terres forestières" a été adoptée par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural du Viet Nam (UNDP, 1997) :

Tableau 27 - Classification nationale des « terres forestières » et superficies (en hectares)

Superficie forestière totale	19 163 000
• Terres sous forêt	9 175 600
• Terres déboisées	9 988 000
Forêts de production	11 816 100
• Terres sous forêt	6 106 900
• Terres déboisées	5 709 200
Forêts à usages réservés	5 900 500
• Terres sous forêt	2 391 200
• Terres déboisées	3 509 300
Forêt de protection	1 446 700
• Terres sous forêt	676 800
• Terres déboisées	769 900

Source : UNDP/MPI (1997).

Les deux grandes préoccupations qui motivent cette approche sont la lutte contre l'érosion des sols et le maintien d'un approvisionnement durable en bois. Nous aurons l'occasion de discuter du bien-fondé de cette politique pour la lutte contre l'érosion des sols dans la suite de ce document.

Le plan forestier, révisé en 1997, prévoit que parmi les 5,7 millions d'hectares, classés comme terrains pour la production forestière, mais actuellement sans couvert forestier, 2 millions seront aforestés par régénération naturelle, 2 millions seront reboisés par la mise en place de nouvelles plantations et 1 million par le développement de systèmes agro-forestiers directement gérés par de petits exploitants d'ici 2003 (MPI/UNDP, 1997). Ce plan correspond à un objectif ambitieux de reboisement de plus de 700 000 hectares par an, ou encore de plus de 2 % de la superficie nationale par an. Il est cependant probable que la date limite pour la réalisation de ces objectifs sera repoussée à 2010 lors de la formulation finale du plan forestier.

Étant donné le scepticisme de certains auteurs quant à l'augmentation du couvert forestier au cours de ces dernières années, il est important de suivre avec précision l'impact des différentes politiques de protection de la forêt. L'indicateur de réponse à la dégradation des forêts devrait donc idéalement être estimé à partir de l'agrégation des résultats en matière de conservation des espaces protégés, de reboisement par plantations, par aforestation et par agro-foresterie.

Ce suivi de l'évolution des différentes formations forestières devrait idéalement être conduit à partir de l'analyse d'images satellitaires et d'enquêtes de terrains. Une telle approche est actuellement menée à titre expérimental par le FIPI et de premiers résultats seraient d'ici peu disponibles. Pour l'heure, nous développerons notre indicateur de réponse à partir des statistiques officielles de reboisement et d'aforestation fournies par les autorités provinciales. En l'absence de données statistiques sur l'agro-foresterie, nous n'incorporerons pas ce paramètre dans la constitution de ce premier indice de réponse à la dégradation des forêts. Les superficies annuelles reboisées et aforestées seront rapportées à la superficie totale par district. Cette approche nous permettra de comparer la performance des différents districts par rapport aux politiques nationales de protection et de développement de la forêt.

Nous identifierons les seuils d'appréciation des efforts de reboisement et d'aforestation de chaque district à partir de l'objectif national de reboisement annuel de plus de 2 % du territoire national identifié dans le plan forestier du Viet Nam, comme suit :

Tableau 28 - Détermination de l'indice de réponse à la dégradation des forêts

Pourcentage annuel de reboisement et d'aforestation	Indice de réponse à la dégradation des forêts	Qualification de la réponse
> 4	1	Très forte
3-4	2	Forte
2-3	3	Moyenne
1-2	4	Faible
0-1	5	Très faible

3.2 ÉLABORATION DES INDICES DE DÉGRADATION DES SOLS

3.2.1 Agrégation de l'indice de risque d'érosion des sols

L'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse sont les trois principaux mécanismes de pertes en terres dans les zones de collines et de montagnes du Viet Nam. Les facteurs influençant ces trois processus d'érosion hydrique sont nombreux, leurs causes variées, leurs expressions multiples et parfois contradictoires.

Après avoir brièvement identifié ces principaux facteurs à partir de l'équation universelle des pertes de sols (Wischmeier *et al.*, 1958; Wischmeier et Smith, 1978), nous présenterons les principales hypothèses de pondération retenues par la Banque Mondiale pour l'élaboration d'un indice de susceptibilité des sols à la dégradation au Viet Nam. En dernier lieu, nous proposerons une méthodologie pour l'agrégation d'un indice de risque d'érosion des hautes terres du Viet Nam.

Nous n'aborderons dans ce chapitre que les points nécessaires à une pleine compréhension de la méthodologie d'agrégation proposée. Pour de plus amples références, une revue bibliographique des principaux mécanismes d'érosion des sols est donnée en annexe VII.

3.2.1.1 Identification des facteurs influençant l'érosion hydrique

L'équation universelle des pertes de sols (EUPS) est le modèle d'estimation de l'érosion des sols le plus fréquemment utilisé au monde. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols des Etats-Unis fut chargé d'analyser et de synthétiser plus de 10 000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith (1960, 1978) était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte contre l'érosion de choisir le type d'aménagement le plus approprié pour maintenir l'érosion à un niveau tolérable dans des conditions de climat, de pente et de production données.

Selon ce modèle, l'érosion hydrique est une fonction de l'érosivité des pluies que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend l'érodibilité de sol, la topographie, le couvert végétal et les pratiques de lutte contre l'érosion. L'équation est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers zéro. L'équation de base de ce modèle est la suivante :

$$A = R * K * SL * C * P$$

Où :

- A = Pertes de terre (en tonnes par hectare).
- R = Indice d'érosivité des pluies. Il s'exprime généralement dans les mêmes unités que A ; dans ce cas, c'est le seul terme du second membre de l'équation ayant une dimension.
- K = L'érodibilité des sols est fonction du taux de matière organique, de la texture, de la perméabilité et de la structure du sol. Il varie de 0,7 pour les sols les plus fragiles à 0,01 pour les sols les plus stables.
- SL = Le facteur topographique, permettant de comparer les conditions topographiques locales à des conditions standard; il met en jeu à la fois l'inclinaison et la longueur de pente.
- C = Le couvert végétal est un simple rapport entre l'érosion sur sol nu et l'érosion observée sous un système de production. Il varie de 1 sur sol nu à 0,001 sous forêt.
- P = Pratiques purement antiérosives. Il varie entre 1 sur un sol nu sans aucun aménagement anti-érosif à 0,1 environ, sur une pente faible avec billonnage cloisonné.

La validité de l'équation empirique de Wischmeier pour des conditions autres que celles de la Grande Plaine des Etats-Unis a été mise en question par de nombreux praticiens (Ministère de la Coopération et du Développement, 1991 ; E. Roose, 1994; PNUE, ISRIC, 1995), qui soulignent les limites intrinsèques suivantes du modèle EUPS :

1. *Il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe.* La source d'énergie du modèle est la pluie. Or, si la contribution de l'énergie cinétique de la pluie est capitale à faible pente, elle devient secondaire par rapport à l'énergie de ruissellement au-delà de 15 % de pente (cf. Annexe VII). Le modèle ne s'applique donc pas à l'érosion linéaire, ni à l'érosion en masse.
2. *Il n'est pas valable au niveau de l'averse.* Ce modèle est basé sur une analyse statistique et ne s'applique que pour des mesures moyennes sur 20 ans. Ce point sera particulièrement important en région tropicale où, du fait de la grande variabilité du régime des pluies d'une année à l'autre, les calculs des pertes moyennes ne sont valables qu'à la condition de pouvoir étaler les observations sur une période suffisamment longue (Ministère de la Coopération et du Développement, 1991).
3. *Il se pose des problèmes d'échelles.* Ce modèle est basé sur des données provenant de petites parcelles (100m²) ou de bassins versants de surface très limitée (quelques hectares). Il se révélera donc peu adapté à la modélisation de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant de moyenne ou grande dimension.
4. *Il néglige les interactions entre les différents facteurs.* Un sol réagit de manière très différente à l'agressivité des pluies en fonction de la pente, selon qu'il est argileux ou sableux, et selon l'état de la surface du sol. Il est donc difficile de donner des valeurs à chaque indice de façon indépendante.

Certaines de ces limitations seront particulièrement importantes dans le cadre de notre étude. En particulier, le modèle s'applique à l'érosion en nappe dans les zones à faible pente des provinces pilotes, mais il s'applique peu aux zones montagneuses à forte pente où se manifestent aussi des glissements de terrain et de l'érosion linéaire. Au-delà d'une inclinaison de pente de 15 %, d'autres facteurs comme la sismicité, la nature du substrat d'altération et la géologie, prépondérants dans le cas d'une érosion en masse, doivent être pris en compte.

3.2.1.2 l'indice de susceptibilité des sols à la dégradation de la Banque Mondiale

Dans le cadre d'une étude sectorielle pour l'environnement au Viet Nam, la Banque Mondiale (1995) s'est efforcée de définir un indice de susceptibilité des sols à la dégradation (*Index of Susceptibility to Deterioration*) afin d'estimer essentiellement la pré-disposition des sols à l'érosion au Viet Nam. Consciente des limitations de l'EUPS dans le contexte vietnamien, la Banque Mondiale a considéré les facteurs d'érosion suivants pour la constitution de cet indice : (i) pente ; (ii) géologie ; (iii) sols ; (iv)

séismicité ; et (v) climat. L'importance donnée à la géologie et à la séismicité semble indiquer un souci de l'érosion en masse du fait du relief accidenté du pays.

Notant que le climat et la séismicité influencent des zones très larges et non des sites spécifiques comme le sol, la pente et la géologie, la Banque Mondiale décida de les considérer comme des éléments facilitant et non comme des facteurs inhérents de l'érosion hydrique.

En conséquence, la Banque Mondiale décida de grouper la pente, le sol et la géologie en un seul indicateur de fragilité inhérente des sols et de lui donner un poids triple dans l'agrégation de l'indice de susceptibilité par rapport à la séismicité ou au climat. La fragilité inhérente des sols représente la prédisposition des sols à l'érosion tandis que la séismicité ou l'érosivité du climat sont considérés comme des facteurs de "probabilité".

Dans la constitution de l'indice de susceptibilité des sols à l'érosion, la valeur 1 fut donnée à une fragilité inhérente des sols faible et 3 à une fragilité inhérente forte. La valeur 0 fut donnée à un degré d'activité sismique faible et une valeur 1 à un degré élevé. L'érosivité du climat fut estimée d'une manière similaire à celle de la séismicité. Sur la base de cette pondération, cinq classes et huit combinaisons de susceptibilité des sols à l'érosion furent déterminées suivant un ordre croissant de risque d'érosion :

Tableau 29 - Détermination des classes de susceptibilité des sols à l'érosion

Niveau de susceptibilité par ordre croissant	Susceptibilité inhérente des sols à l'érosion (forte**, faible-)	Degré d'activité sismique (élevé**, faible-)	Erosivité du climat (forte**, faible-)
1	-	-	-
2	-	*	-
2	-	-	*
3	-	*	*
3	**	-	-
4	**	*	-
4	**	-	*
5	**	*	*

Une carte synthétique de susceptibilité des sols fut constituée par superposition des différentes cartes réalisées pour chacun de ces facteurs. Un classement des provinces du Viet Nam les plus susceptibles à l'érosion fut compilé en superposant la carte du niveau de susceptibilité des sols à l'érosion avec la carte des frontières administratives des provinces du Viet Nam.

Dans son compte-rendu d'étude, la Banque Mondiale souligna qu'un SIG devrait être idéalement utilisé pour agréger un tel indice afin d'en permettre une mise à jour régulière. Étant donné que la plupart des données nécessaires pour la constitution de l'indice n'étaient disponibles que sur support analogique, il fut cependant décidé de superposer manuellement une série de transparents. Le tableau 30 reproduit les résultats de cette recherche par région.

Dans sa forme présente, l'indice de susceptibilité des sols de la Banque Mondiale présente néanmoins des limitations certaines. Il suggère notamment que la province pilote de Lam Dong présente peu de risque d'érosion avec 24 % des sols considérés en classe 1 et 75 % en classe 3. Les observations de terrain menés par le programme STD3 - CT94-0310 montrent au contraire que l'érosion des sols atteint localement des proportions inquiétantes dans cette province du fait de la très forte érosivité des pratiques culturales employées pour la mise en valeur des terres.

Ces résultats s'expliquent par le fait que l'indice de la Banque Mondiale ne prend pas en considération l'influence fondamentale du couvert végétal et des pratiques culturales et anti-érosives sur l'érosion des sols. Les études de Wischmeier et de ses successeurs montrent que ces facteurs sont d'une importance critique dans la détermination du risque d'érosion. Roose (1994) souligne que parmi les facteurs

conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisque l'érosion peut passer de 1 à 1000 tonnes par hectare lorsque, toutes choses restant égales par ailleurs, le couvert végétal d'une parcelle diminue de 100 % à 0 %.

Tableau 30 - Classes de susceptibilité des sols à l'érosion des régions du Vietnam, d'après la Banque Mondiale (par ordre de susceptibilité croissante de 1 à 5)

Région	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Haute région du Nord	2%	10%	41%	44%	3%
Moyenne région Nord	1%	26%	55%	11%	8%
Delta du Fleuve Rouge	0%	75%	20%	0%	5%
Région côtière Nord	4%	25%	39%	29%	4%
Région côtière Sud	29%	21%	27%	23%	0%
Haute région Sud	33%	0%	66%	0%	0%
Région Nord-Est Mékong	98%	0%	2%	0%	0%
Delta du Mékong	100%	0%	0%	0%	0%
Total	29%	14%	37%	18%	2%

3.2.1.3 Détermination d'un indice de risque d'érosion des sols pour les hautes terres du Viet Nam

Compte tenu des limitations de l'EUPS et de l'indice de susceptibilité des sols à la dégradation de la Banque mondiale dans le cadre des provinces pilotes, le programme STD3 - CT94-0310 développera un indice de risque d'érosion prenant à la fois en compte les facteurs influençant l'érosion en masse en zones montagneuses et l'importance du couvert végétal et des pratiques culturales sur l'érosion des sols. Cet indice de risque d'érosion des sols incorporera les facteurs suivants : (i) pente ; (ii) morpho-pédologie ; (iii) érosivité des pluies ; (iv) couvert végétal, techniques culturales et aménagement du terrain (terrasses, etc.).

a. *Pente* : La pente intervient dans les phénomènes d'érosion par sa forme, sa longueur et son inclinaison (cf. annexe VII). Les sept classes de pentes retenues par le programme STD3 - CT94-0310 à partir des cartes topographiques nous permettront d'estimer de façon plus précise l'influence de ce facteur clef en zones montagneuses. À partir de ces sept classes de pentes, le tableau 31 donne les cinq classes de risque retenues pour refléter l'influence de la pente sur l'érosion des sols. L'influence exacte de la pente varie suivant le type de sol. Étant donné l'importance de la pente dans les mécanismes d'érosion, nous retiendrons comme paliers principaux 3 %, 8 %, 15 % et 40 % pour représenter pleinement l'influence de ce facteur à de faibles et moyennes inclinaisons.

b. *Erodibilité des sols et géologie*. Aux États-Unis, Wischmeier et Smith ont calculé des régressions multiples entre l'érodibilité des sols et 23 paramètres différents du sol sous pluie naturelle et sous pluie simulée sur des parcelles de référence. Après simplification, il s'avéra que l'érodibilité dépendait principalement du taux de matière organique du sol, de la texture et de la structure du sol, et de sa perméabilité.

Tableau 31 - Influence de l'inclinaison de la pente sur le risque d'érosion des sols

Classes de pente (exprimée en %)	Influence sur le risque d'érosion (classes par ordre de risque croissant)
0-3	1
3-8	2
8-15	3
15-25	4
25-40	4
40-60	5
> 60	5

Suite aux travaux de Wischmeier, Singer (1978, rapporté par Roose, 1994) a montré qu'il fallait tenir compte de quelques facteurs supplémentaires, en particulier de la teneur en fer et alumine, du type d'argile et de la salure des matériaux, pour mieux évaluer l'érodibilité des sols. Connaissant la texture des horizons de surface, leur taux de matière organique, la teneur en fer et alumine libre, le type d'argile, avec en plus quelques observations sur le profil, on peut aujourd'hui faire une première estimation de la résistance des sols à l'érosion en nappe et en rigole.

Comme ces paramètres ne sont pas pris en compte au plus haut niveau des classifications pédologiques, Roose (1994) souligne que l'on ne trouve pas de relation stricte entre l'érodibilité et les différentes classifications pédologiques existantes. En l'absence d'informations détaillées sur ces paramètres à l'échelle d'une province vietnamienne, l'adoption d'une classification pédologique pour estimer l'érodibilité des sols apparaît néanmoins comme la solution la plus appropriée.

Sur la base d'une carte des sols préparée par l'Institut National de Prévision et de Planification Agricole (NIAPP), la Banque Mondiale a identifié les sols "gris dégradés" et les sols "rouges et jaunes" comme particulièrement sujets à des phénomènes d'érosion. Cette classification des sols fut développée au début des années 70 par les pédologues vietnamiens en association avec des pédologues soviétiques. Elle est parfois difficile à corréler avec le système FAO-UNESCO des sols, utilisé généralement comme référence internationale.

Par exemple, le groupe "sols gris dégradés" recouvre des unités de sols développés sur des matériaux très différents auxquels la riziculture a imprimé dans la partie supérieure du profil des caractères morphologiques et des propriétés physico-chimiques analogues (INRA, 1987). Ils peuvent provenir aussi bien de formations deltaïques anciennes que de produits d'altérations de roches grésoschisteuses et de granites. De plus, ces sols se trouvent en zone de plaine dans la province de Thai Nguyen et semblent plus sensibles aux phénomènes de dégradation physique et chimique sans entraînement de terre qu'aux phénomènes d'érosion.

Afin de corréler de façon plus précise l'influence de la morphologie et du type de sols sur les phénomènes d'érosion, nous adopterons la classification donnée au tableau 31. Elle est basée sur la carte morpho-pédologique de la province de Thai Nguyen établie par le projet STD3, avec référence au système de la carte mondiale des sols de la FAO-UNESCO.

L'estimation de la sensibilité des unités morpho-pédologiques à l'érosion est basée à la fois sur une revue de la littérature existante et des observations de terrain réalisées par Pierre Brabant (P. Brabant, communication personnelle, 1999), pédologue confirmé de l'IRD. Cette classification en fonction de la morpho-pédologie permet de prendre pleinement en considération l'influence de la géologie sur l'érosion en masse. À l'opposé des matériaux alluviaux, les schistes et les grés présentent des plans de clivage ou de fracture préférentiels qui les rendent comparativement sensibles à l'érosion en masse, surtout si le pendage est parallèle à la pente.

Tableau 32 - Influence de la morpho-pédologie sur la susceptibilité des sols à l'érosion

Unité morpho-pédologique	Paysage morpho-pédologique	Géologie/Lithologie	Classification pédologique FAO-UNESCO	Susceptibilité à l'érosion
Vallées	Bassins sédimentaires inondables	Alluvions quaternaires (avec dépôts annuels)	Fluvisols eutriques Fluvisols gleyi-eutriques	1
	Bassins sédimentaires non inondables	Alluvions quaternaires (sans dépôts récents)	Fluvisols eutriques	1
	Bassins sédimentaires	Alluvions quaternaires (avec irrigation sur alluvions)	Anthrosols cumuliques Fluvisol eutriques	1
	Glacis occupant de petites dépressions ou adjacent aux vallées principales	Colluvions	Regosols eutriques Cambisols dystriques	1
Marche nord du delta du Fleuve Rouge et de la plaine du lac de Nui Coc	Paysage de vallées peu incisées à larges interfluves plans entaillés par des vallées étroites	Alluvions anciennes et alluvions-colluvions récentes	Collines : Cambisols dystriques, Alisol ferriques Bas-fonds : Luvisols eutriques	2 1
		Argilites et alluvions-colluvions récentes	Collines : Acrisols ferriques et hapliques, leptosols dystriques. Bas-fonds : Luvisols eutriques	2 1
		Grès et autres roches riches en quartz et alluvions-colluvions récentes	Collines : Leptosols dystriques, Acrisols ferriques et hapliques. Bas-fonds : Luvisols eutriques	4 1
Basses collines	Collines convexes séparées par de larges bas-fonds	Schistes, schistes à quartz ou schistes calcaires	Collines : Acrisols hapliques, cambisols dystriques. Bas-fonds : Fluvisols eutriques	4 1
		Granite	Collines : Ferralsols hapliques, Acrisols hapliques Bas-fonds : Fluvisols eutriques	3 1
		Gabbro	Collines : Cambisols ferralliques Bas-fonds : Fluvisols eutriques	3 1
	Collines convexes séparées par des bas-fonds étroits	Schistes, schistes quartzitiques ou schistes calcaires	Collines : Cambisols dystriques, Leptosols dystriques. Bas-fonds : Fluvisols eutriques	4 1
		Alluvions anciennes	Collines : Cambisols dystriques Acrisols hapliques (?) Bas-fonds : Fluvisols eutriques	3 1
		Granite	Collines : Ferralsols hapliques Acrisols hapliques Bas-fonds : Fluvisols eutriques	3 1
Zones de collines formant une transition vers les hautes terres	Collines irrégulières séparées par des vallées en V agencées suivant un réseau dendritique	Schistes, schistes quartzitiques ou schistes calcaires	Cambisols dystriques, leptosols dystriques, Acrisols hapliques	5
		Granite	Acrisols hapliques, Ferralsols xanthiques, Cambisols dystriques.	4
Zone de montagne	Massifs fortement disséqués	Schistes quartzitiques et grès	Leptosols dystriques, Cambisols humiques, Cambisols ferralliques Cambisols dystriques	5
	Massifs fortement disséqués avec paysages karstiques isolés	Schistes intercalés avec des bancs calcaires	Leptosols dystriques, Cambisols ferralliques Alisols hapliques Phaeozems hapliques. Lithosols.	5
	Montagne de Tam Dao	Rhyolite	Leptosols dystriques, Leptosols umbriques	5
	Massifs modérément disséqués avec sommets en forme de dôme	Granite	Cambisols ferralliques, Boulders	4
		Gabbro	Cambisols ferralliques	3
Karsts en tourelle	Calcaire fortement cristallisé	Lithosols, Phaeozems calcaires, Lixisols hapliques	1	

Source : P. Brabant, communication personnelle (1999).

c. *Erosivité des pluies.* Wischmeier (1978) a combiné dans un seul indice d'érosivité (EI_{30}) l'énergie de chaque averse multiplié par l'intensité maximale en 30 minutes (en mm/h). Sur un modèle similaire aux isohyètes, des courbes d'iso-érosivité ont pu être établies (cf. Annexe VII). De telles courbes ne sont pas disponibles pour le Viet Nam. Un total de 121 stations pluviométriques a été installé au Viet Nam, dont 97 au nord du 17^{ème} parallèle. Seulement sept d'entre elles sont opérationnelles dans les hautes terres du sud du pays. Ces données n'ont encore été synthétisées que sous la forme d'une carte

des isohyètes. Le Service Hydrométéorologique du Viet Nam les a néanmoins analysées pour indiquer une intensité de pluie moyenne journalière, une valeur maximale, une probabilité d'événement sur la base de 1, 5, 10, 20 et 50 pour cent.

À défaut de courbes d'iso-érosivité, la Banque Mondiale a retenu une probabilité de 20 % d'une précipitation journalière moyenne de 150 mm comme palier pour identifier les stations dont les intensités de précipitations sont susceptibles d'être hautement érosives.

Le programme STD ne dispose de données sur les précipitations journalières maximales que pour trois stations météorologiques sur une durée de 10 ans dans la province de Thai Nguyen. Du fait du peu d'informations disponibles sur l'intensité maximale des pluies dans les provinces pilotes, la méthodologie développée par la Banque Mondiale au niveau national n'offre qu'un faible intérêt pour notre domaine d'étude. Dans la recherche d'une plus grande précision, nous calculerons les isohyètes annuelles de Thai Nguyen à partir des données moyennes de pluies disponibles sur une période d'observation commune pour les stations météorologiques concernées. Nous supposerons une forte corrélation entre la pluie moyenne annuelle et une probabilité de pluie de forte intensité et donc d'érosivité des pluies. Le résultat est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau 33 - Influence des précipitations sur l'érosion des sols

Précipitations annuelles moyennes (mm)	Influence sur l'érosion des sols (par ordre croissant de 1 à 5)
<800	1
800-1400	2
1400-2000	3
2000-2600	4
>2600	5

d. *Influence du couvert végétal et des techniques culturales.* Pour lutter contre l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes de l'année où les pluies sont les plus agressives, qu'il ralentit le ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité à la surface du sol.

Autant une utilisation des sols en accord avec leur vocation peut permettre de compenser une susceptibilité inhérente à l'érosion, autant le déboisement et des pratiques inadaptées en accentueront la propension. Plusieurs pratiques culturales sont particulièrement nocives du point de vue de la conservation des sols, telles que : (i) l'absence de couvert végétal durant la période de pluies de moussons ; (ii) la simplification des assolements et des rotations ; (iii) principalement la mise en culture de sols fragiles ; et (iv) le surpâturage.

D'autres pratiques culturales et aménagements du terrain anti-érosifs permettent au contraire de réduire le ruissellement des eaux et les dégâts occasionnés par l'érosion. Les techniques et aménagements les plus répandus sont : (i) la culture en courbe de niveau ; (ii) le billonnage en courbe de niveau ; (iii) la culture en bandes en courbe de niveau, isolées par des bandes d'arrêt enherbées ; (iv) les terrasses ; (v) le paillage naturel ou artificiel ; (vi) le paillage artificiel avec des produits comme l'acétate de polyvinyle ; et (vii) les plantes de couvertures (légumineuses).

**Tableau 34 - Influence du couvert végétal et des pratiques culturales sur le risque d'érosion
(de 1, risque faible, à 4, risque fort)**

Occupation des terres	Description	Influence sur l'érosion des sols
Terres forestières		
Protégées	Forêt dense protégée (en théorie le massif du Tam Dao à partir d'une altitude supérieure à 600 m)	1
Non Protégées		
• Forêt dense à larges feuilles sempervirente ou semi-décidue	• La superficie occupée annuellement par les cultures et les jachères récentes (<4 ans) est inférieure à 5 % de la superficie totale	1
• Végétation herbacée	• Correspond à ce qui est dénommé en vietnamien "Dat trong", "Barren lands" en anglais et "Terres dénudées" en français	2-3
Terres agricoles		
Zone à agriculture pluviale, sans terrasse, avec association de cultures annuelles et pérennes	Les zones à agriculture strictement pluviale et permanente sur les versants des collines et des montagnes ne couvrent que de faibles zones	4
Zone à agriculture irriguée dans les plaines	Se trouve dans les plaines occupant la partie méridionale de la province. Culture irriguée du riz dominante	1
Zone à agriculture irriguée dans les vallées de montagne	Localisée dans les bas-fonds et vallées étroites des zones montagneuses, et dans des vallées du paysage des collines	1
Zone à agriculture pluviale et irriguée.		
• À production végétale dominante	Dans les hautes collines, associant des cultures pérennes sur les collines et de la riziculture irriguée dans les zones basses	2-3 collines et 1 zones basses
• À production diverse	Dans les vallées larges de la zone montagneuse, dans les basses collines, dans les dolines et zones basses en relief calcaire	1
Terres mixtes, forestières et agricoles		
Terrain à agriculture récurrente.		
• Cultures et jachères récentes couvrant 5 à 25 % du terrain.	La superficie occupée annuellement par la culture pluviale récurrente et les jachères récentes (<4 ans) sur les terrains en pente couvre de 5 à 25 % de la superficie totale. Pas de terrasse.	2
• Cultures et jachères récentes couvrant plus de 25 % et moins de 75 % du terrain.	La superficie occupée annuellement par la culture récurrente et les jachères récentes (<4 ans) sur les terrains en pente couvre de 25 à 75 % de la superficie totale. Il existe rarement des terrasses.	3-4
Mosaïque de terres agricoles et de terres forestières.		
• Dominance de cultures pérennes.	Dans la zone des collines. Les zones à cultures irriguées des terres basses et les zones cultivées en agriculture pluviale sur les collines (principalement des plantations de thé et fruitiers) occupent une superficie plus grande que les terres forestières.	1 terres basses et 4 collines basses.
• Dominance des plantations forestières et des friches.	Localisé principalement dans les paysages des hautes collines. Les terres forestières occupent une superficie plus grande que les terres cultivées.	2

Source: Légende de la carte d'occupation des terres de la Province de Thai Nguyen par P. Brabant (1999).

Les effets de pratiques anti-érosives peuvent être contradictoires : certaines ayant pour objectif de réduire le ruissellement, afin de limiter l'érosion linéaire, peuvent en retour favoriser l'érosion en masse. La classification de l'occupation des terres, réalisée par le programme STD, couvre à la fois les principaux types de couverture du sol et de pratiques culturales. Le tableau 34 représente les valeurs

attribuées à l'influence du couvert végétal et des pratiques culturales sur la protection des sols contre le risque d'érosion à Thai Nguyen.

3.2.1.4 Agrégation de l'indice de risque d'érosion des sols

L'indice de risque d'érosion des sols sera agrégé par addition des différents facteurs susmentionnés. Étant donné l'influence prépondérante du couvert végétal et des techniques culturales en zone montagneuse tropicale, nous donnerons un poids double à ce facteur dans l'équation d'agrégation. Cette approche permettra aussi de distinguer la vulnérabilité inhérente des sols à l'érosion de l'influence d'une occupation des sols inadaptée. Nous obtenons ainsi l'équation d'agrégation suivante :

$$RA = (R + K + S + 2C)/5$$

Où :

- RA = Risque de pertes de terre, de 1 (très faible) à 5 (très fort).
- R = Indice d'érosivité des pluies, de 1 (très faible) à 5 (très fort).
- K = L'érodibilité des sols et géologie, de 1 (très faible) à 5 (très fort).
- S = La pente, de 1 (très faible) à 5 (très fort).
- C = Le couvert végétal et les pratiques culturales, de 1 (très faible) à 5 (très fort).

Cette équation d'agrégation nous permettra d'estimer le risque d'érosion à l'échelle d'une unité mopho-pédologique. Afin de permettre une comparaison en fonction des limites administratives, nous estimerons aussi le risque d'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province ; cela à partir du pourcentage de sols présentant un risque d'érosion faible ou très faible (1 ou 2), comme suit :

Tableau 35 - Classes de risque d'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province

Pourcentage de sols présentant un risque d'érosion faible ou très faible	Classes de risque d'érosion	Qualification du risque d'érosion
> 80	1	Très faible
60-80	2	Faible
40-60	3	Moyen
20-40	4	Fort
<20	5	Très fort

3.2.2 Agrégation d'un indice d'état d'érosion des sols pour les hautes terres du Viet Nam

3.2.2.1 Différentes méthodologies possibles pour estimer l'état d'érosion des sols

Il existe plusieurs façons d'estimer l'état de l'érosion :

- Les enquêtes sur le terrain, consistant à comparer, à recenser et à classer les signes visibles d'érosion.
- L'adaptation aux conditions locales de modèles numériques d'estimation de l'érosion à partir de parcelles expérimentales.
- La mesure des sédiments en suspension dans le réseau hydrologique.

Dans le monde entier, l'état de dégradation des terres est un sujet controversé. Les estimations sur l'étendue de la dégradation des terres peuvent être exagérées par les services nationaux afin d'obtenir un éventuel financement et un mandat accru (P. Brabant, S. Darracq, K. Egué, V. Simonneaux, 1996). Compte tenu de l'importance de cette donnée pour l'analyse de l'état de l'environnement et la prise de décision pour le développement durable des hautes terres, le programme STD3-CT94-0310 comparera les résultats obtenus par deux approches : (i) l'analyse des signes visibles de l'érosion ; et (ii) le développement d'un modèle d'érosion adapté aux conditions des hautes terres du Viet Nam.

Le modèle d'érosion de sols sera développé par l'Institut Agronomique de Gembloux en conclusion du programme STD. Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée pour estimer l'état de dégradation des sols à partir des signes visibles d'érosion.

3.2.2.2 Agrégation de l'indice d'état de dégradation des sols à partir des signes visibles

À partir d'un important travail de terrain, d'analyses d'images satellitaires et de documents cartographiques, le programme STD3 - CT94-0310 a dressé un inventaire des signes visibles d'érosion des sols d'une part et d'autre part de dégradation *stricto sensu* (sans entraînement de terre) dans les provinces pilotes. Cet inventaire a été mené suivant la méthodologie d'étude de l'état de dégradation des sols développée par l'IRD (anciennement ORSTOM) au Togo (P. Brabant, S. Darracq, K. Égué, V. Simonneaux, 1996). Elle repose sur la définition de trois paramètres principaux: le type de dégradation, l'extension et le degré de dégradation. Dans le cadre de cette étude, nous ne reprendrons ici que le seul aspect «érosion»¹⁴ de ce travail d'inventaire. Trois types d'érosion seront discutés: l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse.

L'extension de l'érosion est la proportion de terrain soumise à un type d'érosion donné dans une zone déterminée. L'extension de l'érosion sera estimée en pourcentage et divisée en cinq classes, comme suit:

Tableau 36 - Détermination de l'extension de l'érosion

Extension de l'érosion (en % du terrain)	Indice d'extension	Qualification de l'extension
< 5	1	Très faible
5 - 15	2	Faible
15-30	3	Moyenne
30-50	4	Forte
>50	5	Très forte

Le degré de dégradation par érosion exprime le stade de gravité atteint par l'érosion dans une zone déterminée du terrain (P. Brabant, 1997). Les tableaux 37 et 38 développés par P. Brabant (1997) présentent les principales variables prises en compte pour évaluer le degré d'érosion en nappe et d'érosion linéaire.

Tableau 37 - Classification du degré de l'érosion en nappe

Indicateurs	Degré	Cls
Cela correspond aux marques de l'érosion naturelle, qui varie selon le type de sol et les conditions de terrain. Le terrain est généralement non cultivé et sous végétation spontanée, ou situé dans une zone protégée, sans activités humaines.	Nul à très faible.	1
Diminution d'épaisseur de la couche d'humus < 1/5 ème dans le sol non défriché: quelques dépôts de sable sont observés à l'amont des obstacles sur le terrain (touffes d'herbes, cailloux). Accumulation locale des fractions fines dans les petites dépressions du terrain. Baisse peu ou pas sensible de la productivité.	Faible	2
Diminution d'épaisseur de la couche d'humus > 1/5 ème et < au 1/3. Touffes d'herbes en partie déchaussées: accumulation de sable fin et de limon à la surface du terrain dans les sites favorables à ces dépôts. Quelques encroûtements couvrant moins de 10 % du terrain. Baisse sensible de la productivité, de 25% environ.	Moyen	3
Diminution d'épaisseur de la couche d'humus de moitié environ. Touffes de graminées fortement déchaussées. Racines des arbres et arbustes dégagées en dessous du collet. Nombreux dépôts de sable et de limon dans les parties basses du terrain. Encroûtements nombreux à la surface du sol. Des zones dénudées, sans végétation spontanée peuvent couvrir de 10 à 25 % de la surface du terrain. Baisse de la productivité de l'ordre de 50 %.	Fort	4
Diminution d'épaisseur des ¾ de la couche d'humus. Localement, cette couche a disparu, parfois sur la plus grande partie du terrain. Racines des arbres et arbustes apparentes sur plusieurs centimètres ou décimètres. Couvert végétal spontané fortement réduit. Grandes espaces dénudés. Abondants dépôts de sables, fin et grossier, dans les parties basses du terrain et dans les axes de drainage. Nombreux encroûtements. Couvert herbacé fortement réduit. Zones dénudées pouvant couvrir plus de la moitié de la surface du terrain. Baisse de la productivité supérieure à 75 %. Terrain souvent abandonné.	Très fort.	5

Source: P. Brabant – « Méthode d'évaluation de l'état de dégradation des terres » (révision octobre 1997).

¹⁴ Erosion avec déplacement de terre

Tableau 38 - Classification du degré de l'érosion linéaire

Indicateurs	Degré	Cls
Peu ou pas de marques d'érosion linéaire.	Nul à très faible.	1
Griffes d'érosion dans la couche arable, s'effaçant avec le travail du sol, même à la houe.	Faible.	2
Rigoles d'érosion pouvant atteindre localement la base de la couche arable. Ne s'effaçant pas avec le travail du sol à la houe.	Moyen.	3
Ravines atteignant les couches inférieures du sol, sur une partie du terrain et jusqu'à 1 m de profondeur. Le passage des engins agricoles est encore possible bien que difficile. La productivité a fortement baissé globalement.	Fort.	4
Ravines profondes et nombreuses jusqu'à la base du sol et pouvant atteindre 10 m de profondeur sur plus de 5 m de largeur. L'utilisation d'engins agricoles est impossible. Des éboulements incontrôlés se produisent en bordures de ravines. Le terrain, difficilement exploitable pour les cultures annuelles, pérennes et pour l'élevage, a perdu sa valeur marchande. Il est souvent abandonné.	Très fort.	5

Source: P. Brabant – « Méthode d'évaluation de l'état de dégradation des terres'' (révision octobre 1997)

L'indice d'état de l'érosion du sol sera obtenu par l'équation suivante :

$$IEE = (DE + EE)/2$$

Avec :

IEE = Indice d'état d'érosion, de 1 (très faible) à 5 (très fort).

DE = Degré d'érosion, de 1 (très faible) à 5 (très fort).

EE = Extension de l'érosion, de 1 (très faible) à 5 (très fort).

Cette équation d'agrégation nous permettra d'estimer l'état de l'érosion à l'échelle d'une unité morpho-pédologique ou d'une parcelle. De même que pour le risque d'érosion, nous estimerons l'état de l'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province à partir du pourcentage de sols présentant un état d'érosion faible ou très faible (1 ou 2), comme suit :

Tableau 39 - Classes d'état d'érosion à l'échelle d'un district ou d'une province

Pourcentage de sols présentant un état d'érosion faible ou très faible	Classes d'état d'érosion	Qualification de l'état d'érosion
> 80	1	Très faible
60-80	2	Faible
40-60	3	Moyen
20-40	4	Fort
<20	5	Très fort

3.2.3 Agrégation d'un indice de réponse à l'érosion des sols

Comme indiqué précédemment, le reboisement des terrains forestiers constitue la base de la stratégie de lutte contre l'érosion des sols au Viet Nam. Rappelons que le FIPI considère comme terres forestières tous les sols ayant une pente de plus de 25 degrés (soit 47%), quelque soit le couvert réel de ces terrains.

Afin de permettre un suivi plus précis des progrès de mise en œuvre de cette stratégie, nous proposons comme indicateur de réponse le pourcentage de terrains classés forestiers et ayant actuellement un couvert forestier. Les classes de réponse à l'érosion des sols seront déterminées comme suit :

Tableau 40 - Classes de réponse à l'érosion des sols

Pourcentage de terrains classés forestiers et ayant un couvert forestier	Classes de réponse	Qualification de la réponse
> 80	1	Très forte
60-80	2	Forte
40-60	3	Moyenne
20-40	4	Faible
<20	5	Très faible

Un reboisement de plus de 80 % des terrains classés forestiers dans une zone donnée indiquera une réponse très forte à l'érosion des sols (1). Par contre, le reboisement de moins de 20 % des sols classés forestiers dans une zone donnée indiquera une réponse très faible à la stratégie nationale de lutte contre l'érosion (5).

3.3 ÉLABORATION D'INDICES DE PENURIE EN EAU

3.3.1 Développement d'un indice de risque de pénurie en eau

Généralement, un pays ne peut capter qu'une partie de son approvisionnement annuel en eau par les précipitations, à l'aide de barrages, de petits réservoirs et de pompes directs de l'eau dans les rivières et les aquifères. Les sources les plus proches et les plus économiques sont utilisées en premier lieu. Il devient ensuite de plus en plus difficile et onéreux d'accéder aux sources les plus éloignées.

Le risque de pénurie en eau est généralement estimé à partir de l'intensité d'utilisation des ressources. Un groupe de travail réunissant 9 agences des Nations Unies (UN, 1997) a proposé d'exprimer l'intensité d'utilisation à partir du rapport entre le volume disponible et le volume prélevé, comme suit :

$$PE (\%) = 100 [1 - (\text{Prélèvements annuels} / \text{Approvisionnements annuels})]$$

Avec :

PE = Pression sur les réserves en eau (%).

PA = Prélèvements annuels des ressources en eaux renouvelables (m3).

AP = Approvisionnement annuel (m3).

Les Nations Unies distinguent quatre grandes catégories de pression sur les eaux suivant le pourcentage de la ressource en eau prélevé :

- *Pression peu élevée.* Les pays qui utilisent moins de 10 % de leurs ressources en eaux renouvelables ne souffrent généralement pas de crise de l'eau.
- *Pression modérée.* Il a été observé que la pression sur les ressources en eau débute dès que l'utilisation des eaux douces excède 10 % des réserves renouvelables et devient plus prononcée dès que ce taux atteint 20 %. Les pays dont la consommation est comprise entre 10 et 20 % indiquent généralement que la disponibilité en eau douce devient un facteur limitant, et que des investissements importants sont requis pour augmenter l'approvisionnement et réduire la demande.
- *Pression forte.* Quand la consommation en eau d'un pays se situe entre 20 et 40 % de son approvisionnement annuel, un soin important doit être attaché à résoudre les problèmes de compétition entre les différents secteurs d'activités humaines et les besoins des milieux aquatiques. Des investissements importants sont nécessaires pour augmenter l'efficacité de l'utilisation des eaux.

- *Pression très forte.* Une utilisation de plus de 40 % de l'approvisionnement annuel en eau d'un pays reflète une pénurie extrême. Cette situation pose un très fort risque de surexploitation des nappes souterraines et de dégradation des milieux aquatiques. La mise en place d'infrastructure de désalinisation peut être nécessaire, augmentant dramatiquement le coût de l'eau et les coûts de production industrielle. Dans un tel cas de figure, l'eau peut devenir le facteur limitant le plus important de développement économique.

Un indicateur annuel de pression sur la ressource en eau sera développé en accord avec l'équation et les seuils de tolérance définis par les Nations Unies. Le tableau 41 présente ces seuils.

Tableau 41 - Intensité de l'utilisation de l'approvisionnement annuel en eau

Pourcentage d'eaux douces utilisées	Indice de pression	Qualification de cette pression
< 10	1	Très faible
10-20	2	Faible
20-30	3	Moyenne
30-40	4	Forte
> 40	5	Très forte

3.3.2 Elaboration d'un indice d'état de pénurie en eau

Cet indice aura pour objet de refléter la fréquence, durée et le degré des périodes de pénurie en eau. Des pénuries en eau prolongées menaceront les fonctions vitales suivantes du système hydrologique :

- *Production agricole.* Du fait de l'irrégularité des précipitations, l'irrigation est indispensable pendant toute l'année pour assurer le maintien d'une production rizicole suffisante pour l'alimentation de la population de cette zone du Viet Nam. L'irrigation et une gestion durable des ressources en eau sont donc essentielles pour assurer la sécurité alimentaire de Thai Nguyen.
- *Développement industriel et urbain.* Des pénuries importantes se traduiront par une compétition accrue et des conflits entre les différents usagers de l'eau. L'eau est un élément majeur de la plupart des processus industriels. L'eau ne représente cependant qu'une faible part des coûts de production industrielle dans les régions correctement desservies en eau (1 à 2 %). Une étude d'HABITAT à Lagos (1990) a par contre montré qu'elle peut représenter jusqu'à 20 % des coûts de production dans une situation de pénurie.
- *Recharge des nappes phréatiques.* Les eaux souterraines jouent un rôle capital dans l'alimentation en eau des populations et la régulation des débits des cours d'eau. Des pénuries en eau de surface se traduiront rapidement par une surexploitation des nappes souterraines et une réduction de la recharge de ces nappes à partir des eaux de surface.
- *Maintien de la vie aquatique.* Un débit minimum devra être maintenu pendant toute l'année pour assurer la survie de l'écosystème aquatique.
- *Assimilation des contaminants.* Jusqu'à un certain seuil, l'eau joue un rôle puissant d'assimilation naturelle des contaminants¹⁵. Ce seuil est fonction du débit du réseau hydrologique et de la charge, de la nature, et de la distribution temporelle et spatiale des contaminants.

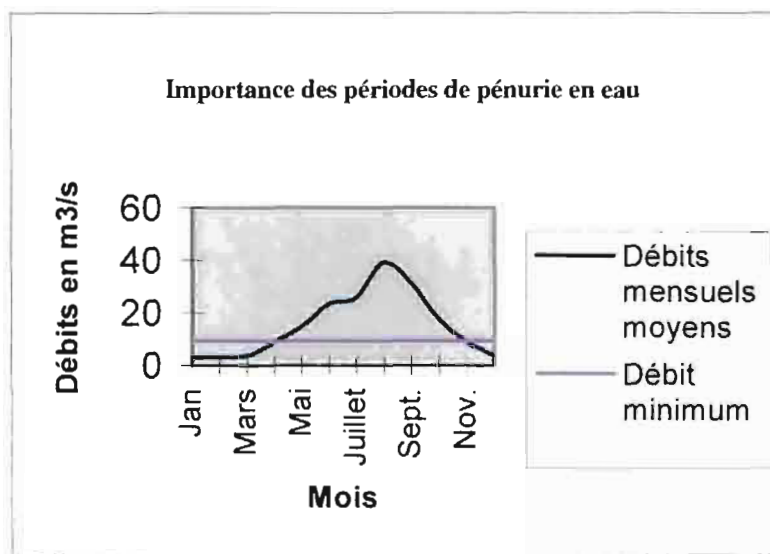
¹⁵ Les processus d'assimilation diffèrent entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les principaux processus d'assimilation des eaux de surface englobent la dilution, sédimentation, floculation, volatilisation, biodégradation, aération, vieillissement, et ingestions par les organismes vivants. Avant d'atteindre les eaux souterraines les contaminants sont filtrés par une colonne de sol. Les processus d'assimilation des contaminants dans le sol comprennent la décomposition aérobie et anaérobie, la filtration, les échanges ioniques, l'absorption et la dilution.

- *Énergie et transport.* L'énergie hydroélectrique est la première source d'énergie au nord Viet Nam. Le réseau hydrographique joue aussi un rôle important pour le transport des marchandises et des personnes dans le pays.

L'objectif fondamental de toute planification des ressources en eau est donc d'assurer un débit minimum pendant toute l'année pour répondre aux différentes demandes exercées sur la ressource et maintenir l'ensemble des fonctions socio-économiques et environnementales du système hydrologique. L'indice d'état de pénurie en eau devra mettre l'accent sur ce concept fondamental pour la gestion durable de la ressource en eau dans les hautes terres du Viet Nam.

La figure 18 illustre l'importance de cette notion de maintien d'un débit minimum d'étiage dans un contexte de forte variabilité saisonnière du régime hydrologique. Les débits mensuels moyens d'un cours d'eau type des hautes terres du Viet Nam sont représentés sous la forme d'une courbe hydrographique. Le débit minimum d'étiage nécessaire pour préserver l'ensemble des fonctions hydrologiques susmentionnées est visualisé par une droite. Cette approche graphique permet de mettre en évidence, d'une part le nombre de mois par an où les débits mensuels moyens ne sont pas suffisants pour maintenir le débit minimum d'étiage et d'autre part l'importance de ces déficits. Signalons dès à présent que ce débit minimum d'étiage est fonction des conditions socio-économiques et écologiques à un moment donné et variera fortement au cours du temps. Si la notion de débit minimum est fondamentale, sa valeur est relative.

Figure 18 : Illustration de l'importance des périodes de pénurie en eau



Pour mettre en évidence la fréquence, la durée et l'importance de possibles périodes de pénurie en eau à Thai Nguyen, nous nous proposons d'estimer le débit minimum d'étiage souhaitable pour chaque bassin versant majeur de la province. Sur la base de cette estimation, l'indice d'état des pénuries en eau sera calculé à partir du nombre de mois par an où les débits mensuels moyens ne sont pas suffisants pour maintenir le débit minimum d'étiage.

Tableau 42 - Détermination des classes de pénurie en eau

Nombre de mois de déficit par rapport au débit minimum d'été	Classes de pénurie en eau	Qualification de cette pénurie
1	1	Très faible
2	2	Faible
3	3	Moyenne
4	4	Forte
≥ 5	5	Très forte

Cet indicateur estime la pénurie potentielle en eau en l'absence d'infrastructures hydrauliques de régulation du débit hydrologique. Nous reviendrons sur ce point à l'occasion de l'agrégation de l'indicateur de réponse à la pénurie en eau.

3.3.3 Elaboration d'un indice de réponse à la pénurie en eau

Si l'irrigation est essentielle pour la production agricole des moyennes et basses terres, elle est aussi de loin la première consommatrice d'eau. Dans ce contexte, plusieurs éléments de réponse, structurels et non-structurels, à des pénuries d'eau saisonnières sont envisageables :

Régulation des débits saisonniers. L'augmentation de la capacité de stockage de l'eau à l'aide de réservoirs permet de réguler les débits hydrologiques saisonniers et de réduire la fréquence des inondations et sécheresses en écrêtant les crues et en soutenant les étiages. Le Viet Nam a actuellement la plus faible capacité de stockage de l'eau en Asie (voir figure 19).

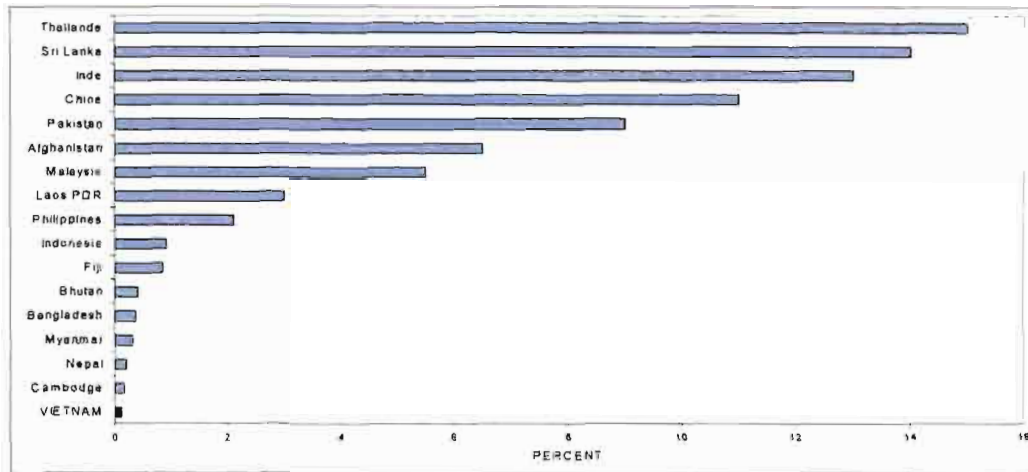
Recouvrement total des coûts de gestion de l'eau. La capacité réelle de stockage des réservoirs existant au Viet Nam est bien inférieure à leur capacité théorique du fait de moyens financiers insuffisants pour en assurer l'entretien et le bon fonctionnement (M.Silver, 1999). Le prix de l'eau est administrativement déterminé au Viet Nam. En général, il ne permet de couvrir que les 2/3 des seuls coûts d'entretien et de fonctionnement (MOSTE/UNDP, RRDM, *Background Paper 4*, 1995). Une réforme du prix de l'eau apparaît comme une condition pour la réhabilitation des ouvrages existants et un accroissement durable de la capacité de régulation hydrologique au Viet Nam.

Augmentation de l'efficacité de l'irrigation. La Banque Asiatique de Développement estime l'efficacité de l'irrigation au Viet Nam à 30 % (ADB, 1998). De nouveau, une réforme du prix de l'eau apparaît comme une condition pour une réhabilitation des périmètres irrigués existants et un développement de techniques d'irrigation économes en eau.

Attribution de droits de prélèvements. La détermination d'un débit minimum d'été et l'attribution de droits de prélèvement maxima aux différents usagers sont des instruments puissants d'optimisation économique et environnementale des ressources en eau (*World Bank. Technical paper 198*, 1994).

Diversification agricole. La culture du riz est particulièrement exigeante en eau (FAO, 1996). La popularisation croissante de nouvelles cultures comme la patate douce ou le maïs pourrait se traduire par une plus faible demande en eau agricole.

Figure 19 : Capacité de stockage par rapport à l’approvisionnement annuel en eau en Asie



L’augmentation de la capacité de stockage de l’eau pour le développement de l’énergie hydroélectrique, le contrôle des inondations et l’accroissement des surfaces irriguées est la stratégie privilégiée du Gouvernement du Viet Nam depuis le début des années 90. Ces initiatives devraient mobiliser près de 20 % des investissements publics du pays au cours de cette décennie.

Tableau 43 - Investissements publics pour la gestion des ressources en eau (\$ X million)

Secteur	1991-1996 (estimations)	1996-2000 (prévisions) ¹⁶
Hydro-électricité	400	1 940
Approvisionnement urbain en eau	280	872
Assainissement urbain	-	890
Irrigation, drainage et contrôle des inondations	400	653
Canaux	-	116
Approvisionnement en eau potable et en assainissement en milieu rural	-	30
Total ressources en eau	1 080	4 501
Totaux Investissements Publics	4 000	15 600

Source: Viet Nam Infoterra Newsletter 3/97

En termes de protection de l’environnement, la régulation des débits à l’aide de réservoirs est un remède puissant qui peut tuer le patient, pour peu que la posologie soit inexacte. Si la croissance de la capacité de stockage n’est pas intimement liée à la notion de maintien d’un débit minimum d’étéage, elle risque de se traduire par une augmentation des surfaces irriguées à court terme sans gain en matière de disponibilité et de qualité de l’eau pour les autres usagers. À long terme, elle résultera en une pression encore plus élevée sur la ressource en eau et un risque accru pour la santé des populations et des écosystème aquatiques.

En accord avec le plan d’investissement national, nous adopterons l’augmentation de la capacité de régulation des débits comme indicateur de réponse aux pénuries en eau, mais nous associerons étroitement son interprétation au concept de maintien d’un débit minimum pour préserver les fonctions vitales du système hydrologique pendant la période d’étéage. Dans ce dessein, nous nous efforcerons de

¹⁶ En l’absence d’une politique agressive de recouvrement des coûts et de mobilisation du secteur privé, une étude de la Banque Mondiale a conclu que le plan d’investissement avait peu de chance d’être réalisé en accord avec les prévisions.

calculer le volume effectif stocké par les réservoirs existants dans les deux principaux bassins versants de Thai Nguyen. Nous essayerons ensuite d'estimer le volume d'eau manquant pour maintenir le débit minimum d'étiage. Nous calculerons enfin le pourcentage du déficit d'étiage actuellement compensé par le volume effectif stocké par les réservoirs existants. Cette approche peut se traduire sous la forme de l'équation suivante :

$$CM = (V-S)/100$$

Avec :

CM = Capacité de maintien du débit minimum pour préserver les fonctions vitales du système hydrologique pendant la période d'étiage (%).

V = Volume d'eau manquant pour maintenir le débit minimum d'étiage (m³).

S = Volume d'eau effectif stocké par les réservoirs existants (m³).

L'indice de capacité de soutien des étiages sera divisé en cinq classes à partir de ce pourcentage obtenu, comme suit :

Tableau 44 - Indice de capacité de soutien des étiages

Pourcentage de maintien du débit minimum d'étiage à partir des réservoirs	Indice de capacité de soutien des étiages	Qualification de cette capacité
>80	1	Très forte
80-60	2	Forte
60-40	3	Moyenne
40-20	4	Faible
< 20	5	Très faible

3.4 ELABORATION D'INDICES DE POLLUTION DE L'EAU

3.4.1 Elaboration d'un indice de risque de pollution de l'eau

3.4.1.1 Sélection des émissions contaminantes pour l'agrégation d'un indice de pollution de l'eau

Les principales sources de pollution de l'eau dans les hautes terres du Viet Nam sont : (i) la contamination fécale du fait des pratiques de défécation en plein air et du faible nombre de latrines améliorées ; (ii) les sédiments en suspension dans l'eau provenant de l'érosion des sols ; (iii) la contamination des eaux de surface par des rejets domestiques et industriels non traités ; (iv) les eaux usées de l'extraction minière ; et (v) les composés agrochimiques. Une description plus détaillée de chacune de ces sources de pollution dans les hautes terres du Viet Nam est donnée en annexe VIII.

Idealement, un indicateur de pollution de l'eau devrait refléter l'ensemble de ces sources de contamination. Compte tenu de l'état embryonnaire du système de suivi de la qualité de l'eau, une telle approche ne peut être mise en œuvre dans l'immédiat au Viet Nam. Nous concentrerons donc nos efforts sur les principales sources de pollution de l'eau.

La contamination fécale semble être la source majeure de pollution biologique de l'eau à Thai Nguyen alors que les sédiments charriés par les eaux constituent le principal problème de pollution de l'eau d'origine physique. Par rapport à ces deux sources de pollution, les pollutions chimiques et organiques d'origine industrielle et domestique paraissent être limitées aux abords immédiats des zones industrielles de Thai Nguyen et de Song Cong (voir 2.2.2.4).

Les décideurs vietnamiens sont particulièrement concernés par l'impact de la sédimentation sur le contrôle des inondations¹⁷ et la durée de vie des ouvrages hydrauliques. Un objectif majeur des programmes de reboisement et de redistribution des terrains forestiers aux paysans est le contrôle de la sédimentation.

Par contre, une importance relativement réduite est accordée aux problèmes de contamination fécale en milieu rural. Les maladies transmises par l'eau et les excréta humains ont longtemps été considérées comme faisant partie de l'état naturel des choses. Ce n'est qu'en 1996 que le Viet Nam débute, en association étroite avec l'UNICEF, son premier programme d'investissement public en services d'approvisionnement en eau potable et en assainissement en milieu rural (voir tableau 41).

Les problèmes de sédimentation seront considérés séparément lors de l'élaboration des indices d'érosion des sols. La contamination fécale est sélectionnée comme indicateur de pollution de l'eau pour mettre l'accent sur un mécanisme de dégradation trop souvent occulté ou sous-estimé dans les politiques de développement.

3.4.1.2 Agrégation d'un indice de risque de contamination fécale

Les matières fécales sont la principale source de bactéries pathogènes dans les eaux. Les eaux contaminées par des matières fécales posent un danger sérieux pour la santé des populations. Elles ne peuvent être utilisées comme eau de boisson qu'après désinfection (ex: chloration) et, dans certain cas, doivent être interdites à la baignade.

Les émissions fécales seront estimées en multipliant le degré de risque de contamination fécale associé aux pratiques sanitaires rencontrées dans les zones pilotes par la densité de la population, comme suit :

$$\text{IRCF} = \text{Pop.} * \text{RF}$$

Où :

IRCF = Indice de risque de contamination fécale de l'eau, de 1 (très faible) à 5 (très fort).

Pop. = Densité de population (hab./km²).

RCFS = Risque de contamination fécale associée aux pratiques sanitaires existantes.

Le degré de risque associé à chaque type de pratique sanitaire a été identifié en accord avec une étude de l'UNICEF sur l'incidence des vers intestinaux en fonction des pratiques sanitaires (UNICEF, 1995) et de l'étude de l'eau potable et de l'assainissement menée par DANIDA et le CERPAD à Thai Nguyen en 1996. Le tableau 45 représente les seuils ainsi obtenus.

Tableau 45 - Détermination du risque de contamination fécale

Équipements sanitaires	Indice de risque de contamination fécale des eaux	Qualification de ce risque
Fosse septique	1	Très faible
Latrine à double fosse pour compostage	2	Faible
Latrine à simple fosse	3	Moyen
Latrines sur plan d'eau	4	Fort
Aucun (défécation en plein air)	5	Très fort

Les classes de risque de contamination fécale seront obtenues par la méthode des seuils naturels.

¹⁷ En se déposant, les sédiments charriés par les eaux élèvent le niveau du lit des rivières et la hauteur des crues. Ainsi, le lit du Fleuve Rouge, confiné depuis des siècles par des digues, se trouve à plusieurs mètres au-dessus du niveau de la ville de Hanoi. La sédimentation oblige le Département chargé du contrôle des inondations au Viet Nam à rehausser régulièrement la hauteur des milliers de kilomètres de digues du Fleuve Rouge (Silver, Glemarec, 1992).

3.4.2 Agrégation d'un indice d'état de la pollution des eaux

L'indicateur idéal d'état de pollution de l'eau serait la longueur totale de rivières, où le niveau de qualité des eaux serait situé en dessous des normes admises de qualité par type d'usage (boisson, irrigation, récréation, industrie, etc.). À cet effet, des analyses régulières de la composition biologique, chimique et physique des eaux devraient être réalisées pendant toute l'année sur l'ensemble du territoire. Une liste des principaux paramètres de qualité biologique, chimique et physique de l'eau est donnée en annexe V.

Le Viet Nam ne dispose pas actuellement des moyens financiers et techniques nécessaires pour la mise en place d'un système aussi exhaustif de suivi de la qualité de l'eau. Compte tenu de l'importance du risque de contamination fécale, le suivi de la qualité de l'eau des hautes terres pourrait dans un premier temps se concentrer sur des paramètres fondamentaux de la qualité biologique de l'eau comme la concentration en coliformes fécaux et la demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO₅). De telles mesures seraient particulièrement importante en période d'étiage. À titre de référence, l'encadré 5 rappelle brièvement l'intérêt de ces deux indicateurs de pollution organique et fécale de l'eau. Une grille d'interprétation de ces paramètres est donnée en annexe V.

Encadré 5 : Deux paramètres fondamentaux de la qualité biologique de l'eau : les coliformes fécaux et la DBO₅

La concentration en coliformes fécaux. Les matières fécales sont la principale source potentielle de bactéries pathogènes dans les eaux. Les bactéries pathogènes ne sont émises que par un faible pourcentage de la population et représentent un pourcentage très modeste de la masse bactérienne apportée par les matières fécales. Afin de disposer d'une méthode simple et précise, seuls les germes témoins de contamination fécale sont généralement recherchés: coliformes totaux, coliformes fécaux (appelés aussi thermotolérants), streptocoques fécaux, germes sporulés anaérobies sulfitoréducteurs (Degrémont, 1989).

La demande biologique en oxygène. Elle est normalement mesurée au bout de 5 jours, c'est la DBO₅. La micro-organismes utilisent l'oxygène de l'eau pour l'oxydation des matières organiques, qui sont leurs sources en carbone. La DBO₅ mesure les quantités d'oxygènes consommées pour la dégradation des matières organiques présentes dans l'eau. Elle permet donc d'estimer à tout moment le degré de pollution organique d'un milieu aquatique.

Elle est souvent utilisée pour mesurer l'impact qu'auraient des effluents industriels ou domestiques en terme de consommation d'oxygène s'ils étaient directement rejetés dans les cours d'eau sans traitement préalable. Il s'agit donc d'un test fondamental pour évaluer la capacité d'assimilation naturelle des cours d'eau et déterminer les concentrations et quantités maximales des effluents qui peuvent y être déversés.

Comme indiqué en 2.2.1.5, il ne semble pas encore exister de programme de mesures régulières de ces paramètres à Thai Nguyen. Il nous faudra donc choisir un indicateur de remplacement pour permettre, dans l'immédiat, une estimation de l'état de contamination fécale des eaux de la province. L'indicateur de remplacement devra satisfaire aux trois conditions de mesurabilité, de justesse d'analyse et de pertinence politique présentées en 2.3.1 :

- *Mesurabilité.* Pour une mise à jour aisée des indicateurs d'état de la qualité de l'eau, il importe de choisir un indicateur multidimensionnel déjà collecté de façon régulière pour satisfaire à d'autres objectifs de développement considérés comme prioritaires par les responsables vietnamiens.
- *Pertinence.* L'eau est considérée comme abondante au Viet Nam et sa préservation est rarement regardée comme un problème majeur. L'indicateur d'état de la qualité de l'eau devrait aider à une plus grande prise de conscience de l'importance de cette ressource.

- *Justesse d'analyse.* L'indicateur devra permettre de mesurer de façon précise l'impact de la contamination fécale, identifiée comme source majeure de pollution de l'eau dans notre domaine d'étude.

En accord avec ces trois critères, le taux d'incidence des diarrhées est choisi comme indicateur de remplacement pour la qualité de l'eau. Le taux d'incidence des diarrhées est étroitement associé à la contamination fécale de l'eau. Il est collecté mensuellement par les centres provinciaux de médecine préventive et permet de mettre l'accent sur les coûts humains et économiques engendrés par la pollution de l'eau. La moyenne nationale d'incidence de diarrhées était de 1 327 cas par an pour 100 000 habitants en 1996. Sur la base de cette moyenne, nous avons retenu les seuils de tolérance suivants :

Tableau 46 - Détermination des classes d'état de contamination fécale

Taux d'incidence de diarrhées (cas/an/100 000 hab)	Classe d'état de contamination	Qualification de la contamination
< 500	1	Très faible
500 – 1000	2	Faible
1000 – 1500	3	Moyenne
1500 – 2000	4	Forte
> 2000	5	Très forte

3.4.3 Elaboration d'un indicateur de réponse à la pollution de l'eau

Les deux grands axes possibles de réduction de la contamination d'origine fécale de l'eau sont l'éducation des populations et la mise en place d'infrastructures d'eau potable et d'assainissement (AEPA). Afin d'estimer l'importance de ces deux facteurs, nous adopterons comme indicateur de réponse le taux d'équipement en infrastructures d'eau potable et d'assainissement en milieu rural.

Les bases de données socio-économiques gérées par le SIG du programme STD3-CT94-0310 ne contiennent pas pour l'instant d'information sur les infrastructures en AEPA dans les provinces pilotes. Pour conduire cette analyse avec un degré de fiabilité acceptable, nous utiliserons la base de données de l'AEPA développée par l'UNICEF au Viet Nam. Cette base de données couvre l'ensemble du territoire vietnamien. La méthodologie développée pour la province de Thai Nguyen pourra donc être aisément transposée à l'ensemble des moyennes et hautes terres du pays.

La carte 9 représente le pourcentage de la population ayant accès à des services d'AEPA au Viet Nam (essentiellement eau potable). La grande majorité des systèmes d'AEPA en milieu rural est directement financée par les bénéficiaires. Ce n'est qu'en 1996 que le Gouvernement débuta un programme de financement public de l'AEPA en milieu rural au travers du programme WATSAN (*water supply and sanitation*), co-financé et initié par l'UNICEF au début des années 90. La carte 10 représente le pourcentage de la population ayant obtenu un accès à des services d'AEPA à l'aide du programme WATSAN.

En accord avec l'objectif d'aider les populations des provinces pilotes à vivre et à mieux vivre au sein de leur environnement, les seuils d'appréciation des efforts d'investissements pour réduire la contamination fécale de l'eau en milieu rural seront établis par référence aux meilleurs et aux plus mauvais résultats enregistrés au niveau national. Cette approche permet de mettre l'accent sur des objectifs réalistes, à la portée des responsables politiques locaux. Pour ce faire, les moyennes nationales d'accès à des services d'approvisionnement en eau potable et en assainissement par province ont été divisées en cinq classes de réponse à la pollution des eaux selon la méthode des seuils naturels :

Tableau 47 - Classes de réponse à la contamination fécale

Pourcentage de la population ayant accès à des services d'AEPA au Viet Nam	Classes de réponse	Qualification de cette réponse
43-65	1	Très forte
35-42	2	Forte
27-34	3	Moyenne
19-26	4	Faible
8-18	5	Très faible

IV PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS DES INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT POUR LA PROVINCE DE THAI NGUYEN

4.1 INDICES DE DEGRADATION DU COUVERT FORESTIER

L'objet de notre étude n'est pas de réaliser une monographie de la province de Thai Nguyen ou d'analyser les grandes causes de dégradation de l'environnement dans les hautes terres du Viet Nam mais de développer des instruments de communication et de dialogue pour la gestion durable des ressources naturelles. Les analyses des résultats données dans cette quatrième et dernière partie doivent donc se lire comme des guides de présentation des indicateurs d'environnement développés et non comme une exploitation exhaustive des données acquises par le programme STD-CT94-0310.

4.1.1. Indice de pression sur la forêt

Indicateur sélectionné : variation du couvert forestier.

4.1.1.1 Présentation des résultats

Les cartes 11, 12 et 13 représentent le couvert forestier de la province de Thai Nguyen, d'après le FIPI, en 1943, en 1983 et en 1993. Les cartes 14, 15 et 16 représentent les variations positives ou négatives de ce couvert de 1943 à 1993, de 1943 à 1983 et de 1983 à 1993. Ces cartes furent obtenues à partir de la fonction « union » de Arcview.

Les cartes 17, 18 et 19 traduisent les variations du couvert forestier au cours de ces trois périodes en pourcentage de déforestation annuelle, par district. Les superficies forestières et les pourcentages de déforestation par district pour les trois périodes sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 48 - Evolution de la superficie forestière et taux moyen de variation annuelle de cette superficie (exprimé en %) pour les périodes suivantes : 1943-1983, 1983-1993 et 1943-1993

DISTRICT	Forêt 1943 (en ha)	Forêt 1983 (en ha)	Forêt 1993 (en ha)	Variation 1943-1983 (%)	Variation 1983-1993 (%)	Variation 1943-1993 (%)
Dai Tu	26 632	13 962	6 793	- 1.63	- 7.5	- 2.7
Dinh Hoa	24 451	19 156	5 910	- 0.61	- 12.5	- 2.9
Dong Hy	31 468	11 228	1 729	- 2.6	- 20.6	- 6.0
Pho Yen	6 719	6 094	484	- 0.2	- 28.8	- 5.4
Phu Binh	6 467	1 025	1	- 4.7	-	-
Phu Luong	21 119	5 525	1 542	- 3.4	- 13.6	- 5.4
TP Thai Nguyen	2 390	1 095	1	- 1.9	-	-
TX Song Cong	-	-	-	-	-	-
Vo Nhai	31 598	26 936	16 240	- 0.4	- 5.2	- 1.3
<i>Total</i>	<i>150 848</i>	<i>85 025</i>	<i>32 701</i>	<i>- 1.4</i>	<i>- 10</i>	<i>- 3.1</i>

Comme indiqué en section 3.1.1, de fortes questions se posent quant à la validité et la datation exacte de la carte dite de 1943. Dans une moindre mesure, des questions peuvent aussi se poser sur la validité des inventaires de 1983 et de 1993. La carte 20 compare les superficies forestières telles qu'elles ont été identifiées d'une part par le FIPI, en 1993, et d'autre part par le projet STD3-CT94-0310 en 1994.

Un investissement beaucoup plus important a été consenti pour la réalisation de la carte du programme STD-CT94-0310 que pour la carte du FIPI. Bien que les deux cartes aient été réalisées par interprétation d'images satellitaires, la carte du programme STD a en outre été complétée à l'aide de vérifications de

terrain. Il a été ainsi possible de mettre en évidence les formations forestières sur karst qui n'apparaissent pas sur la carte du FIPI.

Si les cartes du FIPI nous paraissent suffisamment fidèles pour une analyse indicative de la variation du couvert forestier et la communication d'un message fort aux décideurs locaux, nous utiliserons la carte bien plus précise du programme STD3-CT94-0310 pour l'élaboration de l'indice d'état de dégradation des forêts.

4.1.1.2 Analyse des résultats

Ampleur de la déforestation. Une conclusion immédiate, que permet l'analyse de cet indicateur, est l'ampleur de cette déforestation. Sur la base des informations disponibles, le taux de déforestation annuel moyen de la province de Thai Nguyen serait de 3.1 % au cours de la période 1943 – 1993 (Voir le tableau 48). Ce chiffre est à comparer à une moyenne nationale déjà extrêmement élevée de 1.6 % au cours de cette même période. En accord avec la classification proposée en 3.1.1 pour l'indice de pression sur la forêt, la déforestation dans la province de Thai Nguyen peut être considérée comme très forte (classe 5).

Le taux de déforestation a fortement augmenté de 1983 à 1993. Le taux annuel moyen est en effet passé de 1.4 % pour la période 43-83 à 10 % pour la période 83-93. Des taux de déforestation de plus de 20 % par an ont été enregistrés dans les districts de Dong Hy et de Pho Yen. La forêt naturelle a entièrement disparue dans les districts de Thai Nguyen et de Phu Binh.

Cette accélération de la déforestation est conforme aux éléments d'histoire agraire de la province de Thai Nguyen donnés en 2.2.1.2. À partir des années 80, l'augmentation de la population et le manque de terres disponibles obligea les autorités provinciales à autoriser les cultures sur les pentes, tout du moins sur les premiers contreforts des versants. Les jeunes qui s'installèrent par la suite rencontrèrent ces mêmes problèmes de manque des terres et furent obligés aussi de s'établir sur les pentes. L'accélération de la déforestation dans la province de Thai Nguyen semble traduire une pression de plus en plus forte exercée par une population en accroissement rapide sur une ressource de plus en plus réduite.

Plus que les causes exactes de la déforestation, il nous semble à ce stade utile d'identifier les facteurs qui ont permis la survie des quelques formations forestières restantes.

a. Topographie

L'accessibilité est une composante clef pour modéliser la dégradation des forêts dans les terres hautes du Viet Nam. Dans les régions à forte densité de population, la forêt non perturbée ne subsiste que sur des sites très difficilement accessibles du fait de la topographie ou de l'absence de voie de communication.

Le croisement de deux thèmes de la base de données, «Altitude» et «Formations forestières résiduelles», dont le résultat est indiqué sur la carte 21, met en évidence l'importance du facteur topographique. Il existe une corrélation presque parfaite entre l'altitude et le couvert forestier. Près de 80 % des forêts résiduelles sont situés à une altitude de plus de 600 mètres. Il convient de noter que 600 m est aussi en principe la limite altitudinale au-delà de laquelle les défrichements sont interdits.

b. Réseaux routier et hydrographique

Si l'importance de la topographie sur la déforestation est généralement reconnue par les décideurs, celle des routes l'est beaucoup moins. La construction de routes est étroitement associée à la déforestation dans la plus grande partie du monde tropical. Instruments de désenclavement et de développement économique puissants, les routes en milieu rural ouvrent aussi une voie d'accès à des forêts jusqu'alors protégées par leur isolement.

Toutes les routes rurales n'ont pas le même impact sur le développement économique et l'environnement. Les décideurs politiques ont tendance à promouvoir un développement extensif du

réseau routier, afin d'accéder à l'ensemble du territoire national. Ces routes excentrées, éloignées des grands centres urbains, ne génèrent que peu de bénéfices économiques. Par contre, elles peuvent mettre en danger des refuges biologiques uniques et se traduire par des coûts énormes en matière de conservation des sols et de l'eau.

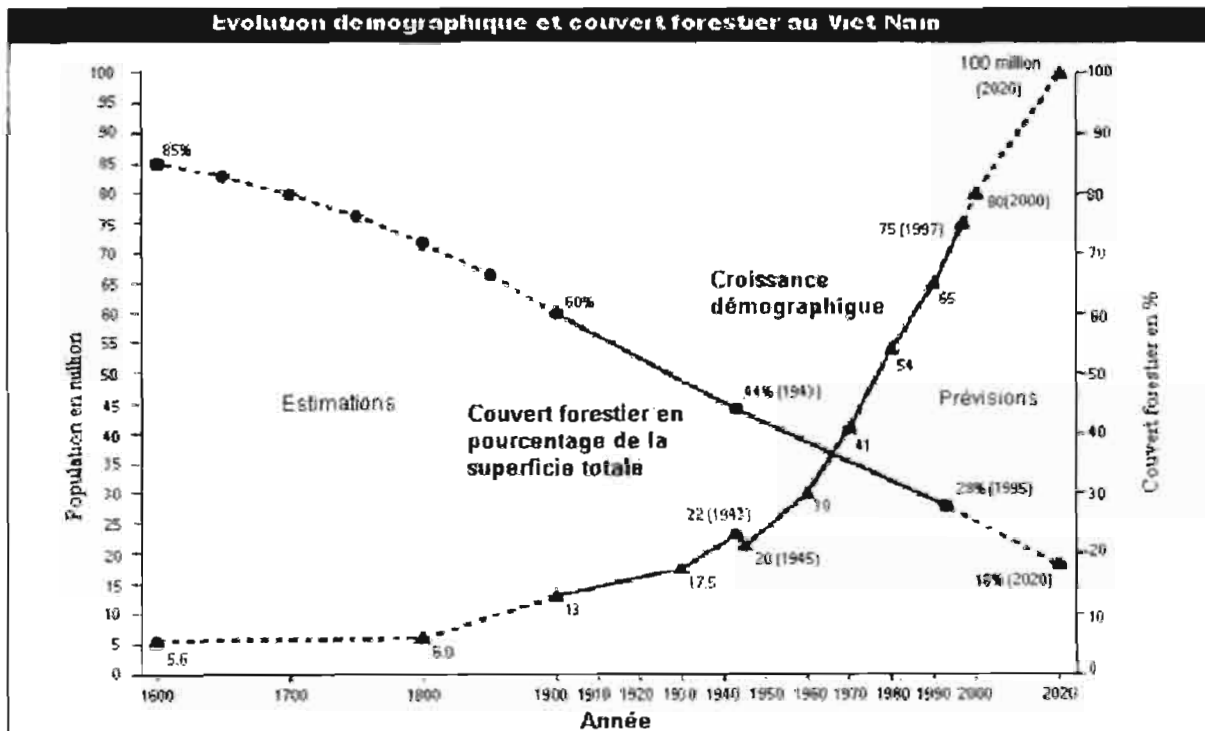
La Banque Mondiale recommande donc une intensification et non une extension des réseaux routiers (K. Chommitz et D. Gray, 1995). En accord avec cette stratégie d'intensification, la construction de nouvelles routes devrait essentiellement se concentrer dans des zones déjà fortement peuplées à proximité des marchés, plutôt que dans des zones faiblement peuplées, éloignées des marchés, d'une faible potentialité économique mais souvent d'une grande richesse biologique.

La carte 22 représente le croisement des thèmes «Réseau routier», «Réseau hydrographique» et «Habitat». L'impact du réseau routier sur la déforestation est clairement visible dans la partie sud-est du district de Vo Nhai où des routes ne desservant qu'un faible nombre de personnes semblent avoir grandement contribué à la déforestation. Une analyse attentive du secteur nord-est de Vo Nhai montre néanmoins qu'en l'absence de route, la population a pu accéder aux vallées alluviales et à des formations forestières isolées à partir des cours d'eau. Ce point est mis en évidence par la carte 23 du district de Vo Nhai.

c. La densité de population

La densité élevée de population est, avec la pauvreté, une cause fondamentale de la déforestation au Viet Nam (J. Carle, 1996). Cette relation étroite est mise en évidence par la figure 20 du *Asia Forest Network* (1998) représentant l'évolution opposée de la population et de la superficie forestière au Viet Nam.

Figure 20 : Évolution opposée de la population et de la superficie forestière au Viet Nam



La densité moyenne de population au Viet Nam était de 223 habitants/km² en 1995 (IUCN/UNDP, 1999). Cette population est inégalement répartie. Elle passe à 500 habitants/km² pour la seule surface arable et à plus de 1 100 hab./km² dans le delta du Fleuve Rouge. Le taux de croissance démographique

reste très élevé et la population pourrait doubler dans les 40 ans à venir (UNDP/IUCN, 1999). Selon les statistiques nationales, 24 millions de personnes vivaient déjà sur des terrains classés comme forestiers en 1996 (UNDP/FAO, 1996).

Afin de mettre l'accent sur la distribution géographique de la population, nous avons choisi de représenter le thème « Habitat » sur la carte 22 plutôt que la densité de la population. Il existe une très forte corrélation entre habitat et couvert forestier dans la partie nord de la province. Dans la partie sud, le statut de Parc national semble offrir une certaine protection au massif forestier du Tam Dao, malgré une forte concentration de population dans le district de Dai Tu.

d. Type de végétation, nature des sols et du substrat géologique

Le type de végétation influence la vulnérabilité des forêts à une exploitation commerciale extractive du bois (valeur économique des essences d'arbres), aux feux de forêts spontanés (résineux en climat sec, etc.) et aux ravageurs et maladies (plantations d'espèces exotiques, etc.). Une fertilité très faible des sols leur confère aussi une protection naturelle contre le défrichage et l'agriculture récurrente.

Les formations karstiques ne représentent que 5,6 % de la superficie totale de la province alors qu'elles abritent 50 % de la forêt dense et ouverte restante à Thai Nguyen. La topographie accidentée, les sols peu épais et pauvres rendent impossible la mise en culture de ces zones. Les essences forestières présentes sur ces sols sont de faible valeur commerciale (trunks minces, bois tendre, etc.). Cette pauvreté du substrat pédologique donne une protection naturelle à ces forêts contre la défriche agricole et l'exploitation commerciale. Il convient néanmoins de ne pas surestimer cette protection naturelle. Ainsi, dans le district voisin de Bac Son (province de Lang Son), des forêts sur karst ont été en grande partie détruites pour récolter du bois utilisé dans les séchoirs pour feuilles de tabac, cultivé dans les vallées adjacentes aux formations karstiques (P. Brabant, communication personnelle, 1999).

Il existe de fortes corrélations entre, d'une part la topographie, les réseaux routier et hydrographique, la densité de population, les types de végétations et de sol et, d'autre part, la déforestation dans la province de Thai Nguyen. En fonction des informations disponibles, il serait intéressant aussi d'évaluer l'impact d'autres causes fondamentales de la dégradation des forêts comme les systèmes fonciers et fiscaux sur la déforestation de Thai Nguyen. Compte tenu des fortes corrélations notées entre déforestation et les principales causes fondamentales de dégradation des forêts à Thai Nguyen, une seconde étape dans cette démarche de développement d'indicateurs d'environnement pourrait consister en l'élaboration par modélisation SIG d'un indicateur de risque de dégradation des forêts, à l'image de l'indicateur de risque d'érosion des sols (cf. 3.2.1).

4.1.2 Indicateur d'état des forêts

Indicateur sélectionné: superficie, distribution spatiale, densité et forme des forêts.

4.1.2.1. Présentation des résultats

Les cartes 24, 25, et 26 représentent les formations forestières restantes en fonction des indicateurs de dimension, de compacité et de fragilité. Le tableau 49 donne les pourcentages de couvert forestier restant en fonction des cinq classes d'état de fragilité des forêts à la dégradation ainsi identifiées: classes de fragilité qualifiées de très faible (1) à très forte (5).

Tableau 49 - Répartition des forêts de la province de Thai Nguyen en fonction de leur fragilité à la déforestation

Classes de fragilité	Superficie (en ha)	En % de la superficie forestière totale	En % de la superficie provinciale totale
1 - Très fragile	4 981	18,32	1,41
2 - Fragile	8 584	31,55	2,43
3 - Moyennement	5 431	19,96	1,54
4 - Peu fragile	5 780	21,24	1,64
5 - Très peu fragile	2 431	8,93	0,69
Total	27 207	100	7,71

4.1.2.2 Analyse des résultats

Forte fragilité des forêts. Un bilan de l'état de la forêt en fonction des quatre paramètres (densité, distribution spatiale, dimension et forme) révèle une bien plus grande fragilité des formations forestières restantes qu'une simple représentation densité/distribution spatiale ne le laisserait supposer. La moitié des forêts denses et ouvertes de la province de Thai Nguyen est classée « fragile » à « très fragile ». Les forêts non perturbées restantes de fragilité moyenne à très faible couvrent donc moins de 4% de la superficie totale de la province de Thai Nguyen. En accord avec la classification proposée en 3.1.2, l'état de dégradation de la forêt peut être considérée comme très fort (classe 5).

Cet indice d'état met aussi en évidence les formations appelées à disparaître en premier dans les années à venir. Au moins d'une politique volontariste de protection de la forêt, seuls cinq formations forestières sur karst devraient survivre à court terme. Trois de ces cinq formations devraient ensuite être rapidement dégradées. L'avenir des forêts denses du massif de Tam Dao est plus difficile à prévoir, du fait du statut de Parc national dont elles bénéficient. La fragilité élevée des extrémités nord et sud du massif, la densité de population dans la périphérie immédiate du Parc et les développements touristiques laissent cependant craindre une érosion progressive mais importante de ces ressources dans les années à venir.

Poids du facteur compacité dans l'équation d'agrégation. Un élément clef de notre analyse de l'état de fragilité de la forêt est l'importance accordée au concept de compacité. Comme indiqué en 3.1.2, l'indice de compacité représente 25 % du poids total de l'indice de fragilité. Nous avons décidé de donner un poids relativement important à ce facteur du fait de son rôle critique dans les phénomènes de morcellement des forêts. Étant donné le très fort morcellement des formations forestières restantes, ce choix se traduit par un indice de fragilité élevé pour près d'un tiers des forêts denses et ouvertes de Thai Nguyen.

La carte 27 montre le résultat que nous aurions obtenu en multipliant par quatre au lieu de trois l'importance de la dimension par rapport à celle de la compacité dans l'agrégation de l'indice de fragilité des forêts. Dans ce cas, la plus grande partie des forêts karstiques et une partie du Tam Dao seraient apparues comme très peu fragiles.

4.1.3 Indicateur de réponses au déboisement

4.1.3.1 Présentation des résultats

Les cartes 28 et 29 représentent les pourcentages de reboisement par plantation et par aforestation à Thai Nguyen en 1993. La carte 30 nous donne l'indice de reboisement total ainsi calculé. Les statistiques concernant la régénération naturelle sont actuellement très rares. Nous avons décidé de prendre comme exemple l'année 1993, car des statistiques provinciales étaient disponibles cette année-là pour ces deux grands mécanismes de reboisement. Les statistiques par district sont données au tableau 50 :

Tableau 50 - Zones reboisées par plantations et régénération naturelle à Thai Nguyen en 1993

District	Densité de population	Plantations forestières en 1993		Régénération naturelle (aforestation) en 1993		Total des zones reboisées en 1993	
	hab./km ²	ha	%	ha	%	ha	%
Dai Tu	283	563	0,99	1 017	1,79	1 580	2,79
Dinh Hoa	185	361	0,70	636	1,24	997	1,95
Dong Hy	229	503	1,06	66	0,14	569	1,20
Pho Yen	480	113	0,39	311	1,08	424	1,47
Phu Binh	534	159	0,62	0	0,00	159	0,62
Phu Luong	340	124	0,33	1 577	4,22	1 701	4,55
TP Thai Nguyen	1 088	157	0,90	0	0,00	157	0,90
TX Song Cong	665	79	1,48	0	0,00	79	1,48
Vo Nhai	67	192	0,22	910	1,07	1 102	1,30
Total		2 251		4 517		6 768	1,91

Source : Institut de Plannification et d'Inventaire de la Forêt du Viet Nam (FIPI).

4.1.3.2 Analyse des résultats

Des taux de reboisement presque satisfaisants. Sur la base des statistiques fournies par le service forestier de la province et le FIPI, les résultats de Thai Nguyen en matière de reboisement sont presque satisfaisants. En accord avec la classification donnée en 3.1.3, l'indice de réponse au déboisement est de 4, très proche de 3. Les superficies reboisées en 1993 (6 768 ha) excèdent les pertes annuelles moyennes en forêts naturelles pendant la période 1983-1993 (5 232 ha). Ceci est principalement dû au taux élevé d'aforestation à Thai Nguyen. Le district de Phu Luong indique par exemple un taux de régénération naturelle de plus de 4 %.

La comparaison de cet indice de reboisement et de l'indice de pression sur la forêt incite néanmoins à une certaine réserve dans l'interprétation des résultats. Un taux de régénération annuel de plus de 4 % est en effet difficile à concilier avec un taux de déforestation de 13.6 % dans ce même district de Phu Luong au cours de la période 1983-1993 (voir carte 19). En l'absence de données complémentaires sur les définitions adoptées par chaque district pour l'estimation des superficies reboisées par régénération naturelle, il est difficile de conduire une analyse plus avancée des données fournies.

Une stratégie de reboisement en accord avec la densité de population. Des efforts importants de reboisement par plantation semblent avoir été conduits dans les districts à forte densité de population tels que Song Cong et Thai Nguyen en 1993, alors que les taux les plus forts de régénération naturelle se rencontrent dans les districts comparativement moins peuplés de Phu Long, Ding Hoa et Vo Nhai.

Cette approche est conforme à la nouvelle stratégie nationale de développement de la forêt qui consiste à promouvoir la régénération naturelle dans les zones peu peuplées et les plantations commerciales à proximité des centres urbains et des marchés pour assurer un taux de rendement acceptable aux petits planteurs.

4.2 INDICES D'EROSION DES SOLS

4.2.1 Indice de risque d'érosion des sols

Indicateur sélectionné : *risque d'érosion des sols, obtenu par modélisation SIG.*

4.2.1.1 Présentation des résultats

Les cartes 31, 32, et 33 représentent l'influence de la pente, de la morpho-pédologie et des précipitations sur l'érosion des sols. La carte 34 montre la vulnérabilité inhérente des sols à l'érosion estimée par croisement de ces trois facteurs. La carte 35 représente l'influence de l'occupation des sols sur l'érosion.

La carte 36 donne l'indice de risque d'érosion obtenu par croisement de la vulnérabilité inhérente des sols à l'érosion et de l'influence de l'occupation des sols sur l'érosion.

4.2.1.2 Analyse des résultats

Une occupation des sols adaptée à leur vulnérabilité inhérente à l'érosion. Près des deux tiers des sols de la province de Thai Nguyen présentent une vulnérabilité inhérente à l'érosion forte à très forte du fait du relief accidenté de la province, de la forte érosivité des pluies de mousson et de la présence de matériaux pédologiques fortement érodibles.

Le risque actuel d'érosion des sols de la province semble néanmoins limité du fait d'une occupation des sols en général adaptée à leur vulnérabilité inhérente à l'érosion. Par exemple, les sols sur schistes des zones de collines et de montagne qui sont très vulnérables à l'érosion sont essentiellement utilisés pour une agriculture récurrente couvrant de 5 à 25 % du terrain. Ce type d'occupation des sols assez peu érosif compense leur forte vulnérabilité à l'érosion. Comme indiqué au tableau 51, guère plus de 22 % des sols de la province présentent actuellement un risque d'érosion fort et seule une superficie négligeable de Thai Nguyen semble exposée à un risque d'érosion très fort, du moins à court terme. En accord avec la classification proposée en 3.2.1.4, le risque d'érosion dans la province de Thai Nguyen peut être considéré comme moyen (40-60 % des sols présentant un risque d'érosion faible ou très faible).

Tableau 51 - Superficie des sols par classe de risque d'érosion

Risque d'érosion	Superficie	
	En hectares	En %
Très faible	61 402	17.4
Faible	111 251	31.5
Moyen	102 560	29.0
Fort	77 991	22.1
Très fort	5	0
Province	353 209	100

Une mise en valeur inappropriée de sols fragiles peut, par contre, entraîner une érosion importante. Ainsi, la mise en valeur par une agriculture récurrente couvrant de 25 à 75 % du terrain des leptosols dystriques dans la zone de montagne de Vo Nhai se traduit par un risque élevé d'érosion. Les mêmes causes et le même résultat s'observent sur les leptosols dystriques de la zone des collines chevauchant les districts de Dai Tu et Phu Long. La gestion du mode d'occupation des terres apparaît donc comme la clé du contrôle du risque d'érosion des sols.

Poids de l'occupation des sols dans l'équation d'agrégation. Un élément clef de notre analyse du risque d'érosion des sols est l'importance accordée à l'occupation des terres. Comme indique en 3.2.1, le poids de l'occupation des terres représente le double de celui des autres facteurs dans l'équation d'agrégation de l'indice de risque d'érosion. Ce poids reflète l'importance prépondérante du couvert végétal parmi les facteurs conditionnels de l'érosion (Roose, 1994).

Un second élément clef est l'évaluation de l'influence de l'agriculture récurrente sur l'érosion des sols. L'agriculture récurrente est souvent citée comme une cause majeure de déforestation et d'érosion aux sols dans les textes officiels. Nous avons pourtant estimé l'agriculture récurrente comme peu érosive lorsqu'elle ne couvre que de 5 à 25 % du terrain. Nous avons en effet considéré que les terrains ainsi défrichés sont rapidement reconquis par une végétation arbustive offrant une bonne protection des sols. Un poids plus faible donné à l'occupation des terres dans l'équation d'agrégation ou une estimation différente de l'influence de l'agriculture récurrente sur l'érosion nous auraient donné, dans les deux cas, une représentation bien plus alarmante du risque d'érosion des sols à Thai Nguyen.

4.2.2 Indice d'état d'érosion des sols

Indicateurs sélectionnés : *inventaire des signes visibles d'érosion.*

4.2.2.1 Présentation des résultats

À partir d'un important travail d'observations de terrain et d'interprétation d'images satellitaires, P. Brabant a dressé pour le programme STD3 - CT94-0310 un inventaire des signes visibles d'érosion et de dégradation sans entraînement de terre de la province de Thai Nguyen. Le tableau 52 présente les résultats de cet inventaire réalisé selon la méthodologie décrite en 3.2.2.1.

Tableau 52 - Évaluation de l'état de l'érosion des sols à partir des signes visibles sur le terrain

Indice	Niveau	État de l'érosion			Commentaire
		Type dominante	Intensité	Extension	
1	Très faible	Érosion en nappe	Faible	Faible	<i>Hautes terres</i> : Dans les zones forestières non cultivées ou très peu cultivées. Tendances stables
2	Faible	Érosion en nappe Érosion linéaire en ravine et érosion en masse	Faible Forte Forte	Moyenne	<i>Hautes terres</i> : Dans les zones mixtes forestières et cultivées, ou les cultures annuelles couvrent moins de 25 % du terrain. Les ravines se situent dans les sentiers de débardage des grumes, utilisés aussi pour le passage des troupeaux. Elles occupent moins de 0.5 % de la superficie de ces zones. Les glissements se situent surtout le long des routes et des berges de rivières. Plus fréquents dans les terres sur schistes.
3	Faible à moyenne	Érosion en nappe	Faible à moyenne	Moyenne à faible	<i>Hautes collines</i> : Collines non déboisées et zones planes cultivées. Les collines, malgré les pentes très fortes, sont peu érodées, sauf localement au bas des pentes sous les plantations de théiers. Tendances à l'accroissement de l'érosion avec le défrichement des collines.
4	Moyenne	Érosion en nappe et érosion linéaire en ravine Érosion en nappe, rarement érosion linéaire en ravine et érosion en masse	Moyenne	Plus de 50 % des collines	<i>Hautes collines</i> : Collines cultivées à plus de 75 %. Érosion par l'eau sur les collines, localement jusqu'au stade de ravines. Tendances à l'accroissement de l'érosion sur les collines. <i>Hautes terres</i> : Zones où la culture récurrente occupe de 25 à 75 % des terres, réduit le temps de jachère et expose le sol plus longtemps à l'érosion pluviale. Les ravines et les glissements de terrain occupent moins de 1 % de la superficie des zones. Tendances à l'accroissement rapide de l'érosion.
5	Forte	Érosion en nappe Érosion en nappe érosion linéaire en ravine et érosion en masse sur les collines	Forte Forte	Plus de 75 % Plus de 80 % des collines	<i>Hautes terres</i> : Sur le sommet et les pentes fortes des versants. Sol peu épais, fortement érodé. Couverture herbacée. Tendances à la stabilisation des zones déjà dégradées, mais extension de l'érosion à de nouvelles zones après culture sans période suffisante de jachère. <i>Basses collines cultivées</i> : Sol parfois extrêmement dégradé ou totalement décapé jusqu'à la couche d'altération, sur les collines.

Source : P. Brabant, communication personnelle, 1999.

La carte 37 a été dressée sur la base de cette analyse. Afin d'éviter de donner l'impression que l'érosion est la seule forme de dégradation des sols existant à Thai Nguyen, la carte 38 représente à la fois les zones où existe une érosion hydrique des sols avec une perte en terre et celles où existe une dégradation *in situ* physique et chimique.

4.2.2.2 Analyse des résultats

Une faible érosion des sols. Le pourcentage de sols compris dans chacune des cinq classes d'état d'érosion est indiqué au tableau 53. Les trois quarts des sols de la province sont très peu ou peu érodés. Seuls 5 % des sols peuvent être considérés comme fortement ou très fortement érodés. En accord avec la classification de l'état de l'érosion des sols donnée en 3.2.2, l'état de l'érosion des sols peut être

globalement estimé comme faible (2) à Thai Nguyen. Les seuls sites où des marques très fortes d'érosion ont été observées sur le terrain sont les basses collines reboisées en eucalyptus (P. Brabant, communication personnelle, 1999).

Tableau 53 – Superficie des sols par classe d'état de l'érosion

État de l'érosion	Superficie (en ha)	Pourcentage
1 Très faible	59 449	17
2 Faible	201 936	56
3 Moyen	73 496	21
3 Fort	9 964	3
4 Très fort	6 018	2
Plans d'eau	2 366	1
Total province	353 229	100

Importance de l'occupation des sols. Ces résultats sont inattendus, étant donné l'importance attachée à la lutte contre l'érosion dans les politiques de protection de l'environnement au Viet Nam. Ils sont néanmoins cohérents avec les résultats de risque d'érosion obtenus par modélisation SIG. Ils confirment l'importance donnée à l'occupation des terres dans l'équation d'agrégation de l'indice de risque d'érosion des sols.

Ils semblent aussi valider l'importance variable donnée à l'agriculture récurrente en fonction de son intensité sur l'érosion des sols. Ainsi, la grande majorité des sols, exploités par une agriculture récurrente couvrant de 5 à 25 % du terrain, ne semble pas soumis à l'érosion. Par contre, les zones d'agriculture récurrente couvrant de 25 à 75 % du terrain, que nous avons estimé comme très vulnérables à l'érosion, correspondent assez précisément aux endroits où une assez forte érosion a été observée sur le terrain. En accord avec cette analyse, l'agriculture récurrente, telle qu'elle est pratiquée actuellement (sans mesures de conservation du sol), apparaît comme viable en dessous d'un certain seuil d'intensité, mais elle est inappropriée au-delà de ce seuil.

4.2.3 Indice de réponses à l'érosion des sols

Indicateur sélectionné : *pourcentage de terrains classés forestiers et actuellement sous forêt.*

4.2.3.1 Présentation des résultats

Le FIPI considère comme terres forestières tous les terrains dont la pente est supérieure à 25 degrés (FAO, 1996). Généralement, la pente est exprimée en degrés dans les documents publiés au Viet Nam. La couverture des pentes réalisée par le projet STD3-CT94-0310 est divisée en sept classes ; la pente est exprimée en pourcentage et non en degré (voir 3.2.1.3) ; cela pour deux raisons : (i) le pourcentage de pente est plus facile à mesurer sur le terrain par les agriculteurs avec des moyens rudimentaires ; (ii) la pente est estimée en pourcentage dans la plupart des ouvrages d'aménagement des terres au niveau international (Province de Thai Nguyen, Rapport explicatif, P. Brabant et S. Darracq, 1999). Le tableau 54 indique les correspondances entre le degré et le pourcentage.

Tableau 54 - Correspondances entre degré et pourcentage de pente

Classe	Pente exprimée en %	Valeur approximative en degré
1	< 3	< 1.7
2	3 – 8	1.7 - 4.6
3	8 – 15	4.6 - 8.5
4	15 – 25	8.5 – 15
5	25 – 40	15 – 22
6	40 – 60	22 – 31
7	>60	> 31

Pour estimer la superficie des terrains forestiers de la province, nous avons donc retenu tous les terrains dont la pente est supérieure à 40 % (au-dessus de 22° environ). Les terrains forestiers ainsi identifiés couvrent 121 799 hectares, soit 34 % de la superficie totale de la province. Le tableau 55 reproduit les différents types d'occupation des sols existant sur ces terrains forestiers.

Tableau 55 - Occupation du sol sur les terrains dits forestiers, dont la pente est supérieure à 40%

Code d'occupation des sols	Type d'occupation	Superficie (ha)	%
201	Forêt dense à larges feuilles, sempervirente ou semi-décidue	19 697,9	16,17
209	Végétation herbacée	1 298,7	1,07
271	Zones à agriculture pluviale et irriguée – à production végétale dominante	657,1	0,54
272	Zones à agriculture pluviale et irriguée – à production diverse	3 219,8	2,64
331	Terrain à agriculture récurrente – cultures et jachères récentes couvrant plus de 5 à 25 % du terrain	66 250,0	54,39
332	Terrain à agriculture récurrente – cultures et jachères récentes couvrant plus de 25 à 75 % du terrain	16 554,3	13,59
341	Mosaïque de terres agricoles et de terres forestières – dominance des cultures pérennes	2 917,5	2,40
342	Mosaïque de terres agricoles et de terres forestières – dominance des plantations et des friches	7 637,2	6,27
-	Autres	3 566,8	2,40
Total		121 799,3	100

4.2.3.2 Analyse des résultats

Un bon couvert végétal des sols de pente. Seuls 16 % des terrains classés forestiers dans la province de Thai Nguyen sont actuellement sous forêt non perturbée. Ce résultat donnerait à penser que 84 % des terrains à forte pente de la province sont exposés sans défense aux mécanismes d'érosion des sols. Cette impression est immédiatement corrigée si nous considérons comme terrains protégés de l'érosion non seulement ceux sous forêt mais aussi tous ceux qui bénéficient d'une occupation des terres offrant une très bonne couverture végétale aux sols. Ainsi, si nous ajoutons aux superficies en forêts (code 201) celles qui sont mise en valeur par une agriculture récurrente couvrant de 5 à 25 % du terrain (code 331) et celles qui présentent une mosaïque de terres agricoles et forestières avec dominance de plantations forestières et de friches (code 342), il apparaît que 76.8 % des terrains de forte pente de Thai Nguyen sont efficacement protégés de toute érosion par un couvert arbustif dense ou de hautes herbes. Ce résultat expliquerait en grande partie le faible état d'érosion des sols observé dans la province.

Une classification des terrains forestiers peu adaptée aux besoins de la lutte contre l'érosion des sols. En accord avec la stratégie nationale de reboisement des terrains forestiers pour la lutte contre l'érosion des sols, nous avons décidé d'adopter le pourcentage de terrains forestiers actuellement sous forêt comme indice de réponse à l'érosion des sols. Étant donné que seuls 16 % des terrains classés forestiers de Thai Nguyen sont actuellement sous forêt dense, cet indice nous donne une réponse à l'érosion des sols de 5 (très faible) pour la province. Il est évident qu'un tel résultat ne reflète pas la bonne protection de la grande majorité des terrains de pente de la province par un couvert arbustif dense ou herbacé.

Plus qu'un reboisement systématique, une lutte efficace contre l'érosion des sols devrait s'attacher à maintenir un bon couvert végétal des terrains de pente. En accord avec une telle stratégie, un indice plus approprié de réponse à l'érosion des sols serait le pourcentage de terrains en pente protégés par une bonne couverture végétale anti-érosive. Nous obtiendrions dans ce second cas un indice de réponse à l'érosion des sols de 2 (bon) pour la province, frôlant le 1 (très bon).

Un défi difficilement réalisable. Les terrains forestiers représentent plus d'un tiers de la superficie totale de la province (voir tableau 55). Les remettre sous couvert forestier correspond à un reboisement total de

102 101 hectares. Ce chiffre doit être mis en rapport avec un reboisement officiel de 6 768 ha en 1993 et une perte annuelle moyenne de 5 232 hectares sur la période 1983-1993 à Thai Nguyen. Même en prenant pour référence l'excédent forestier de 1993 à propos duquel nous avons émis des réserves, près de 70 ans seraient nécessaire pour remettre sous forêt l'ensemble des terrains classés forestiers de Thai Nguyen.

De plus, une telle politique de reboisement ne serait pas forcément souhaitable. La classification présente des terres conduit aussi à considérer comme terrains forestiers des terres défrichés de longue date et utilisés pour la production vivrière. Espérer que les paysans des hautes terres acceptent de convertir ces terres agricoles en plantations pour la lutte contre l'érosion des sols est irréaliste.

Une option pour résoudre les difficultés associées à la classification présente des terres serait de déplacer le débat du degré de la pente aux types d'occupation des terres. Suivant la profondeur du sol, de nombreux types d'occupation des terres permettent une mise en valeur durable des terres de pente jusqu'à 60 %. En conséquence, une option serait de repousser à 60 % la limite des terrains à vocation exclusivement forestière et d'autoriser sur les terrains de pente de 40 à 60 % des types d'occupation des terres plus flexibles et mieux adaptés aux réalités des systèmes agraires des hautes terres du Viet Nam.

La superficie totale des terrains de pente de plus de 60 % est de 45 236 ha à Thai Nguyen. Bien qu'il s'agisse encore d'une tâche importante, le reboisement systématique des seuls terrains de pente de plus de 60 % semble apparaître comme une politique plus appropriée aux conditions actuelles des hautes terres du Viet Nam.

4.3 INDICES DE DEGRADATION DE LA RESSOURCE EN EAU

4.3.1 Indice de risque sur la disponibilité en eau

Indicateur sélectionné : *intensité d'utilisation des ressources en eau (%)*.

4.3.1.1. Présentation des résultats

Une analyse hydrologique exhaustive des ressources en eau de la province exigerait des données journalières brutes sur la plus longue période de temps possible et cela pour le plus grand nombre de stations et de paramètres hydrologiques possible.

Les données hydrologiques sont disparates et peu fiables au Viet Nam (OMM, 1994). De plus, elles sont souvent regardées comme confidentielles. La base de données du programme STD - CT94 - 0310 reprend telles quelles les données hydrologiques mises à la disposition du programme par le Service Hydrométéorologique national (SH). Seules deux des neuf stations hydrologiques répertoriées dans la base de données du programme STD fournissent les informations de base nécessaires pour une analyse de l'approvisionnement en eau annuel. De plus, ces données sont agrégées sous forme de moyennes pour des périodes différentes et déjà anciennes.

L'objet de cette partie n'est donc pas de conduire une analyse complète de l'approvisionnement en eau annuel de Thai Nguyen, mais simplement d'illustrer l'approche proposée pour la construction d'indicateurs de pénurie en eau. Une grande prudence sera requise dans l'interprétation des résultats ainsi obtenus.

a. Approvisionnement annuel en eau des deux grands bassins versants de Thai Nguyen

Les données disponibles au travers du SIG nous donnent les termes du bilan hydrologique suivants pour les bassins versants du Cau et du Cong aux stations de Thac Buoï et de Tan Cuong (Rapport du projet STD3- TAB 14, sous répertoire HYDRO) :

Tableau 56 - Termes du bilan hydrologique des bassins du Song Cau et du Song Cong

ID	Station	Rivière	SB	P	E	S	P	R
2	Thac Buoï	Cau	2220	1560	857	526	177	703
9	Tan Cuong	Cong	548	1867	949	796	122	918

Avec :

ID = Numéro d'identification des stations hydrologiques.

SB = Superficie du bassin versant (km²).

P = Hauteur d'eau des précipitations (mm).

E = Hauteur d'eau évaporée (mm).

S = Hauteur d'eau écoulée en surface (mm).

P = Hauteur d'eau de percolation (mm).

R = Hauteur totale d'eau écoulée (mm).

Étant donné l'importance capitale de la superficie totale dans le calcul de l'approvisionnement en eau annuel, nous avons calculé la superficie des deux bassins versants à partir de la couverture du réseau hydrographique du SIG et du modèle numérique de terrain. Nous avons ainsi obtenu une superficie totale de 2 212 km² pour la partie Thai Nguyen du Song Cau et de 976 km² pour le bassin du Song Cong. La superficie calculée à l'aide du SIG pour le bassin du Song Cong diffère fortement de celle fournie par la base de données hydrologiques (976 au lieu de 548 km²). La station de Tan Cuong étant située au milieu du bassin versant du Cong, il est possible que la superficie donnée par le Service Hydrométéorologique se rapporte à la seule partie du bassin du Cong drainée au niveau de la station de Tan Cuong. Nous choisirons pour cette étude la superficie de 976 km², calculée par analyse SIG.

Alors que le bassin de la rivière Cong est entièrement contenu dans la province de Thai Nguyen, la rivière Cau draine aussi une partie de la province de Bac Can (voir cartes 39 et 40). En prenant pour hypothèse qu'un des objectifs à long-terme de la gestion des ressources en eau de Thai Nguyen sera de restreindre sa consommation aux ressources produites sur son territoire, nous limiterons l'analyse de l'approvisionnement et des prélèvements en eau du bassin du Song Cau à la seule partie qui draine la province de Thai Nguyen.

L'approvisionnement en eau annuel (AA) des deux bassins versants nous est ainsi donné par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 AA_{\text{Cau}} &= R * SB * 1000 \\
 &= 703 * 2216 * 1000 \\
 &= 1, 557, 848, 000 \text{ m}^3/\text{an}
 \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned}
 AA_{\text{Cong}} &= 918 * 976 * 1000 \\
 &= 895,968,000 \text{ m}^3/\text{an}
 \end{aligned}$$

b. Prélèvements annuels en eau dans les deux grands bassins versants de Thai Nguyen

Nous estimerons les consommations en eau agricole, industrielle et domestique à partir de la carte d'occupation des terres réalisée par le programme STD3-CT94-0310 et des données disponibles au travers des rapports des départements de l'environnement et de l'agriculture de la province.

Agriculture. L'agriculture est de loin la première consommatrice d'eau dans les moyennes et hautes terres du Viet Nam. Le rapport sur l'environnement de la province de Thai Nguyen estime les prélèvements agricoles de 0.8 à 1 milliard de m³ par an. À partir de la carte d'occupation des sols et des statistiques en surface irriguées fournies par le Département d'irrigation, nous allons essayer d'analyser de plus ample manière cette estimation.

Par superposition de la couverture de l'occupation des sols et des bassins versants, nous obtenons les données d'occupation des sols suivantes pour les bassins du Song Cong et du Cau :

Tableau 57 - Superficie des différents types d'occupation du sol par bassin versant (ha)

Occupation des sols	Bassin Cong	Bassin Cau	Superficie totale (ha)
Forêt dense à larges feuilles, sempervirente ou semi-décidue	5 027,18	18 709,39	23 736,57
Végétation herbacée	1 652,42	757,53	2 409,95
Zone à agriculture irriguée dans les plaines	19 759,87	17 984,20	37 744,08
Zone à agriculture irriguée dans les vallées de montagne	887,43	5 603,87	6 491,29
Zone à agriculture pluviale et irriguée - A production végétale dominante	1 845,75	983,97	2 829,73
Zone à agriculture pluviale et irriguée - A production diverse.	12 927,80	33 233,10	46 160,90
Terrain à agriculture récurrente - Cultures et jachères récentes couvrant de 5 à 25 % du terrain	20 711,20	81 997,94	102 709,14
Terrain à agriculture récurrente - Cultures et jachères récentes couvrant plus de 25 % et moins de 75 % du terrain	8 619,96	16 677,40	25 297,36
Mosaïque de terres agricoles et de terres forestières - Dominance de cultures pérennes	6 858,25	5 679,82	12 538,08
Mosaïque de terres agricoles et de terres forestières - Dominance des plantations forestières et des friches	13 574,06	31 514,44	45 088,50
Habitat urbain continu	0,00	829,14	829,14
Habitat rural avec nombreux jardins	2 626,46	5574,80	8201,26
Exploitation minière à ciel ouvert	128,56	451,40	579,96
Cours et voies d'eau	584,25	841,18	1 425,43
Plans d'eau	2 439,86	568,38	3 008,24
Total	97 643,07	221 406,57	319 049,63

Source : Carte d'occupation des sols du programme STD3-CT94-0310.

Nous ne prendrons en compte dans notre analyse de la consommation en eau que les seules superficies rizicoles dans les plaines et les vallées de montagnes. Nous obtenons ainsi une superficie irriguée de 23 587 ha à partir du Song Cau et de 20 646 ha à partir du Song Cong, soit 44 233 ha à Thai Nguyen. Ces chiffres sont à comparer aux superficies irriguées recensées par le Département de l'Agriculture (DARD) et reproduites dans l'encadré 6. Il n'est guère étonnant de trouver par télédétection une superficie irriguée supérieure à celle estimée par les services agricoles étant donné le très grand nombre de petits périmètres difficile à recenser (44 233 contre 33 500). Nous garderons néanmoins en mémoire cette différence de 25% comme une source possible de surestimation de la consommation en eau.

En sus des superficies irriguées de Thai Nguyen, le réservoir de Nui Coc et les cours d'eau adjacents situés dans le bassin du Song Cong irrigueraient près de 14 000 ha dans la province limitrophe de Bac Giang (DARD, rapporté par M. Silver, 1999). Ce chiffre de 14 000 ha nous paraît très élevé étant donné la capacité effective d'irrigation de 11 500 ha de Nui Coc. Nous retiendrons donc seulement le chiffre de 6 000 ha, correspondant à la différence entre la capacité d'irrigation effective de Nui Coc et la superficie totale de Thai Nguyen irriguée à partir de ce réservoir. Nous obtenons ainsi une superficie irriguée totale de 50 233 ha à partir du Song Cau et du Song Cong, dont 44 233 à Thai Nguyen. Nous nous souviendrons néanmoins que cette décision peut conduire à une sous-estimation de la consommation agricole à partir des eaux du Song Cong et en tiendrons compte dans notre analyse des résultats.

Encadré 6 : Statistiques d'hydraulique agricole de Thai Nguyen

Nombres d'ouvrages d'irrigation : 2 027

Capacité d'irrigation :

- Riz d'hiver/printemps : 21 500 – 22 000 ha
- Riz de mousson : 33 000 – 33 500 ha

À partir des réserves suivantes :

- Lac de Nui Coc : 5 551 ha (capacité de 170 millions m³)
- Barrage de Thai Huong : 2 400 ha
- 270 petits réservoirs : 6 099 ha
- 97 barrages au fil de l'eau : 3 517 ha
- 144 stations de pompes : 3 814 ha
- 1 514 mares et étangs temporaires : 5 486 ha

À partir de la formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith, nous avons estimé les besoins annuels en eau d'un hectare irrigué de riz à 8 440 m³ (voir détails des calculs annexe IX). Ceci nous donne la consommation en eau agricole suivante dans les deux bassins versants :

Tableau 58 - Consommation agricole en eau

Bassin versant	Superficie irriguée (ha)	Consommation en eau (m ³ /ha/an)	Consommation totale (m ³)
Cau	23 587	8 440	199 074 280
Cong	20 646	8 440	174 252 240
Bac Giang à partir du Cong	6 000	8 440	50 640 000
Total	50 233	-	423 966 520

Consommation industrielle. Bien que le secteur industriel ne représente que 4.67 % de l'activité économique de Thai Nguyen, le rapport sur l'environnement de la province de Thai Nguyen estime les prélèvements industriels à 345 millions de m³/an. Ce chiffre très élevé pourrait s'expliquer par les besoins en eau importants pour le lavage du charbon, l'industrie du papier et le refroidissement de l'aciérie de Thai Nguyen. Ainsi, 69 millions de m³/an seraient prélevés pour cette seule usine d'aciérie (UNIDO/Safège, 1994). La consommation en eau industrielle et domestique de la ville de Thai Nguyen fut ainsi estimée à 7,2 m³/s par l'UNIDO et la Safège en 1994, soit près de 240 millions de m³/an.

La plus grande partie de cette eau industrielle serait donc presque immédiatement restituée au système hydrologique et réutilisable après assimilation naturelle des polluants. Pour l'objet de cet exercice purement indicatif, nous considérerons que les deux tiers des eaux prélevées par l'industrie sont restituées au système hydrologique. Nous diviserons par trois la demande industrielle totale et l'estimerons à 115 millions de m³ par an. La ville de Thai Nguyen est située entre les rivières Cau et Cong. La plus grande partie de l'alimentation en eau de la ville est assurée par les eaux souterraines et par le canal de Nui Coc alimenté par le Song Cong (UNIDO/Safège, 1994). Nous considérerons que les trois quarts des eaux consommées par l'industrie dans la province de Thai Nguyen proviennent du Song Cong.

Consommation domestique. Le rapport sur l'environnement de Thai Nguyen estime la consommation domestique à 50 millions de m³ par an. Ce chiffre est bien supérieur aux normes de consommation du Viet Nam qui est de 50 litres par jour en milieu rural et 60 litres par jour en milieu urbain. Ce chiffre

élevé pourrait correspondre aussi aux besoins en eau du bétail. Néanmoins, en l'absence d'information supplémentaire quant à cette demande domestique très élevée, nous adopterons les normes nationales pour notre estimation de la consommation domestique et retiendrons ainsi une demande totale de 18250 millions de m³/an¹⁸. Comme pour les eaux industrielles, nous estimerons que les deux tiers des eaux domestiques sont rapidement restituées au système hydrologique.

Sur la base de ces hypothèses très grossières, nous obtenons les consommations annuelles en eau suivantes :

Tableau 59 - Consommation annuelle en eau de Thai Nguyen

Bassin versant	Approvisionnement annuel (m ³)	Consommation agricole (m ³)	Consommation domestique (m ³)	Consommation industrielle (m ³)	Consommation totale (m ³)	Utilisation des ressources en eau (%)	Indice d'utilisation des ressources en eau
Cau	1 557 848 000	199 074 280	1 500 000	28 750 000	229 324 280	15	2
Cong	895 968 000	224 892 240	4 500 000	86 250 000	315 642 240	35	4
Total	2 453 816 000	423 966 520	6 000 000	115 000 000	544 966 520	22	3

4.3.1.2 Analyse des résultats

Comme indiqué dans l'introduction de ce chapitre, une grande prudence est requise dans l'interprétation de ces résultats, obtenus à partir de données hydrologiques parcellaires. Cela étant, les hypothèses de consommation en eau retenues nous donnent une utilisation de 22 % de l'approvisionnement annuel à Thai Nguyen et de 35 % pour le seul bassin versant du Song Cong. Ceci reflète une pression importante sur l'eau pour l'ensemble de la province et une pénurie potentielle forte pour le bassin du Song Cong.

Bien qu'inférieurs aux estimations du Département de l'Environnement de Thai Nguyen, ces résultats extrêmement élevés de pression sur les ressources en eau sont inattendus. Cette situation fait peser un très fort risque pour la santé publique du fait de la réduction potentielle de la capacité d'assimilation naturelle des eaux. Elle induit aussi un très fort risque de conflits entre usagers de l'eau pour une ressource de plus en plus limitée, de surdimensionnement des périmètres irrigués, de surexploitation des nappes souterraines et de dégradation du milieu aquatique. Si une étude hydrologique exhaustive devait confirmer ces résultats, l'eau pourrait devenir le facteur limitant le plus important pour le développement économique de la province de Thai Nguyen.

4.3.2 Etat de disponibilité de la ressource en l'eau

Indicateur sélectionné: *nombre de mois de déficit en eau par rapport au débit minimum d'étiage.*

4.3.2.1 Présentation des résultats

a. Débits mensuels du Song Cau et du Song Cong

Les débits des rivières Cau et Cong aux stations de Thac Buoï et de Tan Cuong sont donnés dans le tableau 60. La station de Tan Cuong est située au centre du bassin versant du Song Cong et ne mesure qu'une partie du drainage total du bassin (voir carte 8). Pour l'objet de cette étude, nous avons calculé des débits mensuels théoriques du Song Cong à l'exutoire à partir du ruissellement total du bassin et des pourcentages mensuels de débit mesurés à Tan Cuong. Ces débits théoriques figurent aussi au tableau 60 (Cong équivalent).

¹⁸ Consommation journalière par personne (50 litres) x Population de la province (1 000 000) x 365 jours/an.

Tableau 60 - Débits du Song Cau et du Song Cong (en m3/s)

Rivière	Période	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Cau	1960-85	12,5	11	11,4	22,8	43,5	82,1	104	134	96,6	48,7	29	15,6
Cong	1961-76	2,92	3,15	3,5	8,7	14,8	23,4	25,8	39,2	31,2	17,7	8,65	3,86
Cong équivalent		5,43	5,85	6,51	16,18	27,52	43,52	47,98	72,91	58,03	32,92	16,08	7,17

b. Calcul du débit minimum d'étiage

Le débit minimum d'étiage doit permettre de répondre à l'ensemble des demandes exercées sur la ressource en eau : irrigation, développement industriel, alimentation humaine, maintien de la vie aquatique, assimilation des déchets, recharge de nappes phréatiques, énergie et transport (voir 3.2.2).

Débit minimum agricole. Les normes de construction des ouvrages d'irrigation au Viet Nam stipulent qu'ils doivent être en mesure de fournir un débit de pointe de 0.8 l/s/ha à la parcelle pour la préparation du sol avant le repiquage du riz. Une étude de l'irrigation dans le delta du Fleuve Rouge a estimé le débit de pointe nécessaire à 0.63 l/s/ha pour le riz d'hiver/printemps et à 0.78 l/s/ha pour le riz de mousson (MOSTE/UNDP, *Background paper n°4, water resources planning*, 1995). Pour la province de Thai Nguyen, nous retiendrons un débit de pointe de 0.6 l/s/ha pour le riz d'hiver/printemps. Étant donné une efficacité de l'irrigation de 70 %, ceci nous donne une demande en eau totale de 0.86 l/ha/s pour la culture du riz pendant la période d'étiage.

Débit minimum industriel et domestique. Nous avons estimé au chapitre précédent les besoins en eau domestiques à 18 250 000 m3/an. Le Département Provincial de l'Environnement estime les besoins en eau industrielle à 345 000 000 m3/an, la plus grande partie de cette eau servant à subvenir aux besoins de la ville de Thai Nguyen. Comme indiqué précédemment, cette forte demande semble être confirmée par les résultats de l'étude de l'approvisionnement en eau potable de Thai Nguyen menée par l'UNIDO et la Safège. Nous considérerons les demandes industrielles et domestiques stables au cours de l'année et les convertirons directement en l/s.

Débit minimum pour les autres fonctions hydrologiques. Pour l'objet de cette étude purement indicative, nous estimerons le débit minimum nécessaire à l'étiage à la moitié du débit d'étiage moyen. Ce débit minimum correspondant à un débit que nous pourrions rencontrer naturellement à l'occasion d'une année sèche.

Sur la base de ces hypothèses, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 61 - Débit minimum d'étiage du Song Cau et du Song Cong

Bassin versant	Superficie irriguée (ha)	Débit de pointe pendant l'étiage (l/ha/s)	Débit minimum nécessaire pour l'irrigation (l/s)	Débit minimum nécessaire pour l'industrie (l/s)	Débit nécessaire pour l'alimentation en eau (l/s)	Autres fonctions hydrologiques	Débit minimum souhaitable total (l/s)
Cau	23 587	0,86	20 284	2 735	390	6 000	29 409
Cong	20 646	0,86	17 756	8 205	190	1 500	27 651
Bac Giang à partir du Cong	6 000	0,86	5 160	-	-		5 160
Total	50 233		43 200	10 940	580	7 500	62 220

Les estimations nous donnent les résultats suivants :

Figure 21 : Débit minimum d'été du Song Cau

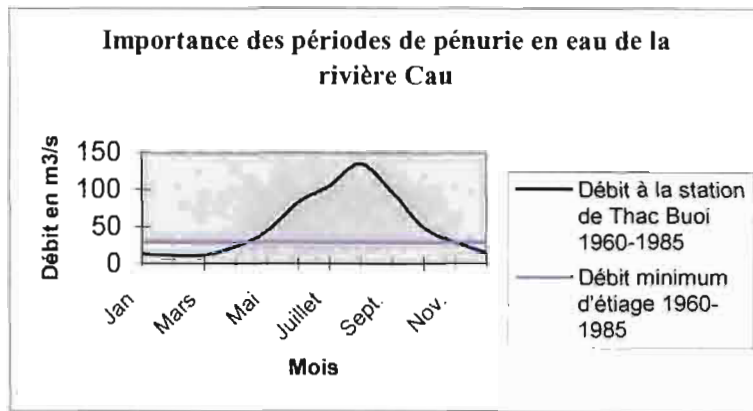
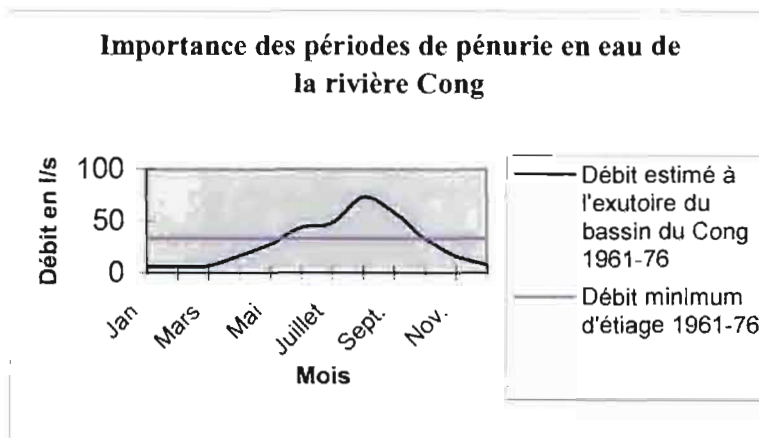


Figure 22 : Débit minimum d'été du Song Cong



4.3.2.2 Analyse des résultats

L'analyse des deux diagrammes de débit minimum nous donne une période de déficit en eau par rapport au débit minimum d'été de plus de 5 mois pour le Song Cong et de près de 4 mois pour le Song Cau.

Tableau 62 - Indice d'état de pénurie en eau

Bassin versant	Nbr. mois de pénurie > 20 % du débit minimum souhaitable	Indice d'état de durée et de degré des pénuries en eau
Cau	> 3 mois	3
Cong	>5 mois	5

Il convient de souligner que les déficits ainsi calculés sont purement théoriques, car ils ne prennent pas en compte les ouvrages de régulation des débits existants à Thai Nguyen.

Comme indiqué par le diagramme ombrothermique (figure 16), il n'y a pas de mois où la production végétale est limitée par les conditions climatiques. La pénurie en eau potentielle enregistrée à Thai Nguyen reflète la forte dépendance du système agricole en ce qui concerne la culture du riz irrigué. La section suivante discute de l'importance des ouvrages de régulations permettant de limiter les pénuries en eau durant la période d'été.

4.3.3 Indice de réponse aux pénuries en eau

Indicateur sélectionné: *capacité de maintien du débit minimum d'étéage.*

4.3.3.1 Présentation des résultats

a. Estimation du volume effectif stocké dans les réservoirs de Thai Nguyen

Les statistiques d'hydraulique agricole de la province (voir encadré 6) mentionne 270 petits réservoirs irriguant 6 100 ha en plus des barrages de Nui Coc et de Thac Huong. Nous ferons l'hypothèse que les 1 514 retenues temporaires, répertoriées par le DARD, sont taries pendant la période d'étéage.

La couverture « Barrage » de la base de données du programme STD ne donne pour l'instant que le nom et la position géographique de 38 réservoirs à Thai Nguyen. Cette couverture ne fournit pas d'information sur la capacité de ces barrages. Pour les besoins de cette analyse, nous aurons donc recours à la base des données hydrauliques rurales du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Cette base de données ne recense que les réservoirs directement gérés par le DARD, du fait de leur dimension ou de la complexité de leur gestion. Elle couvre par contre l'ensemble du territoire vietnamien. Le tableau 62 dressé à partir de cette base de données indique les volumes effectifs stockés et les superficies irriguées par 14 réservoirs de Thai Nguyen et de Bac Kan.

Cette liste nous donne une valeur moyenne de stockage effectif par ha irrigué de 13 227 m³ pour Nui Coc et de 7 464 m³ pour les plus petits ouvrages. En retenant une moyenne de 7 500 m³/ha pour les petits ouvrages et en assumant que les 2/3 d'entre eux se trouvent dans le bassin du Cau et 1/3 dans celui du Cong, nous obtenons la capacité provinciale de stockage suivante :

Bassin du Cong : $168\,000\,000 + (2\,033 \times 7\,500) = 183\,247\,500$ m³

Bassin du Cau : $6\,466 \times 7\,500 = 48\,49\,000$ m³

Tableau 63 - Volume effectif des réservoirs des provinces de Thai Nguyen et Bac Kan

	Nom du réservoir.	Sup. Irriguée (ha)	Volume effectif (million m ³)	Volume total (million m ³)
1	Nui Coc	11 500	168	224
2	Bao Linh	740	6,9	8
3	Phuong Hoang	270	2,15	2,3
4	Quan Che	360	2	2,5
5	Binh Son	359	2,4	2,7
6	Doan Uy	195	0,87	0,9
7	Ban Co	25	0,22	0,24
8	Khuon Nanh	30	0,79	0,8
9	Na Mat	85	0,8	0,85
10	Tan Kim	108	0,8	0,9
11	Tan Hoa	234	1,7	1,9
12	Phó Xuyen	222	1,2	1,3
13	Lang Gay	45	0,2	0,24
14	Cap Ke	84	0,55	0,58
Total		14 257	188,58	247,21

Nous ferons l'hypothèse que les volumes stockés sont libérés de façon régulière au cours des cinq mois de basses eaux (décembre-avril) pour maintenir le débit minimum d'étéage souhaité. Les résultats ainsi obtenus sont donnés au tableau 64.

Tableau 64 : Détermination de l'indice de capacité de maintien du débit minimum

Bassin	Volume effectif d'eau stockée (m3)	Volume d'eau nécessaire pour maintenir le débit minimum souhaitable	Capacité de maintien du débit minimum (%)	Indice de la capacité de maintien du débit minimum
Cau	48 495 000	189 950 000	25,5	4
Cong	183 247 500	381 687 000	48	3
Province de Thai Nguyen	231 742 500	571 637 000	41	3

4.3.3.2 Analyse des résultats

a. L'eau, facteur limitant du développement à Thai Nguyen ?

Les ouvrages de régulation des eaux existants ne peuvent fournir qu'une partie du volume requis pour assurer le débit minimum nécessaire au maintien des fonctions hydrologiques vitales pendant la période d'étiage. Nous avons estimé le débit minimum d'étiage à partir du débit de pointe nécessaire pour la culture irriguée du riz. Le repiquage du riz peut être échelonné sur plusieurs semaines afin de réduire le débit de pointe total. Les eaux stockées peuvent aussi être restituées progressivement en fonction des fluctuations de la demande agricole en eau.

Cela étant, il semblerait que les volumes d'eau stockés par les réservoirs existants ne soient quand même pas suffisants pour compenser la variabilité saisonnière des précipitations et maintenir le débit minimum nécessaire pour préserver l'ensemble des fonctions vitales du système hydrologique pendant la période d'étiage.

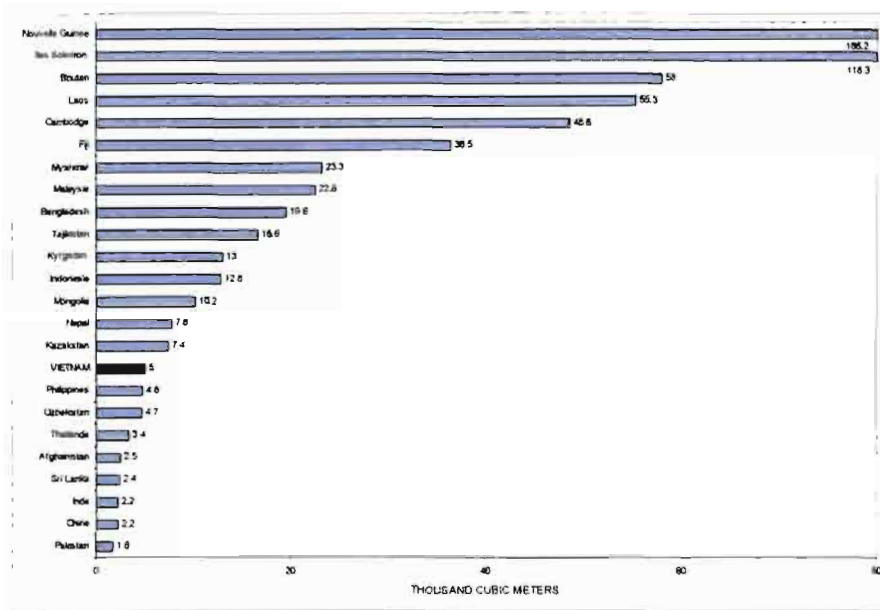
Les résultats de cet simulation encore grossière donneraient à penser que la province de Thai Nguyen utilise la presque totalité de son approvisionnement en eau pendant la période d'étiage et ne peut irriguer qu'une partie de ses périmètres rizicoles pour le riz d'hiver/printemps. L'eau serait ainsi le principal facteur limitant la production agricole. Des ressources en eau réduites pourraient aussi devenir une contrainte pour le développement industriel de la province.

Ces résultats sont inattendus et ne correspondent pas à l'image traditionnelle d'un pays de mousson aux ressources en eau abondantes. Rappelons que sur la base des seuls facteurs climatologiques, il n'existe aucun mois pendant lequel la croissance végétale est limitée. La consommation en eau élevée de la province est directement liée aux besoins en eau importants de la culture rizicole qui demande à être maintenue immergée pendant la plus grande partie du cycle végétatif. Notons aussi que ce problème de limitation en eau, même dans les provinces bien arrosées du nord, a déjà été signalé à plusieurs reprises tant dans des études de terroir que dans des comparaisons de ressources en eau à l'échelle internationale.

Ainsi, P. Lamballe (GRET, 1999) dressait le diagnostic suivant sur le développement agricole dans le district de Tam Dao (partie du massif du Tam Dao situé dans la province de Phu Tho) : « *Le suivi-diagnostic et les expérimentations sur le riz (densités, variétés, fertilisation) montrent que l'eau constitue le principal facteur limitant la production. Ainsi, sur le riz de printemps en 1994 et 96, il a fallu attendre deux mois avant de pouvoir repiquer. La diversification de nos actions à partir de 1994 indique que sur les cultures sèches d'hiver comme sur celles de printemps, le problème de l'eau reste important* ».

De même, une comparaison des ressources en eau menée par la Banque Asiatique de Développement révèle que le Vietnam a l'une des plus faibles ressources en eau par habitant en Asie. Ce point est illustré par la figure 23.

Figure 23 : Approvisionnement annuel en eau *per capita* (x 1 000 m3)



Signalons enfin que le Président du Comité populaire de la province de Thai Nguyen a pris l'initiative d'engager un processus de consultation avec les provinces de Bac Kan, Vin Phuc, Bac Giang, Bac Ninh et Hai Duong, traversées sur 220 kilomètres par la rivière Cau, afin de mettre en œuvre une stratégie commune pour la protection durable de l'eau et de l'environnement. Cette démarche est motivée par une inquiétude croissante quant à la durabilité de la gestion présente de cette ressource (CNFMEE, 1999).

b. La construction de réservoirs, un investissement prioritaire pour le développement durable du Viet Nam ?

Comme indiqué en 3.3.3, la régulation des débits hydrologiques saisonniers est critique pour réduire la fréquence des inondations et des sécheresses et maintenir un débit minimum pour préserver les fonctions vitales du système hydrologique pendant la période d'étiage. Étant donné le rôle crucial que les réservoirs peuvent jouer pour réguler les débits hydrologiques saisonniers et la très faible capacité de stockage actuelle du Viet Nam, il serait tentant de recommander une accélération des programmes d'investissement en ouvrages hydrauliques de régulation.

Les résultats fournis par notre étude de la capacité de maintien du débit minimum d'étiage à Thai Nguyen appellent néanmoins à une certaine prudence dans ce domaine. Malgré la construction du réservoir de très forte capacité de Nui Coc, il semblerait que les risques les plus importants de pénurie en eau se rencontrent dans le bassin du Song Cong. Les eaux de Nui Coc semblent avoir été entièrement absorbées par une augmentation correspondante des demandes, agricole, domestique et industrielle. Si cette hypothèse devait être confirmée, la construction du réservoir de Nui Coc se serait principalement traduite par une augmentation de la pression sur les ressources en eau et non de la capacité de maintien d'un débit minimum d'étiage.

c. La nécessité d'une analyse exhaustive des ressources en eau

Du fait des limitations en données, les résultats de notre analyse hydrologique ne peuvent être regardés que comme indicatifs. La pression sur les ressources en eau et l'état des pénuries pourraient avoir été fortement surestimés pour les raisons suivantes :

- sous-estimation de l'approvisionnement en eau et du débit des rivières Cau et Cong calculés à partir de données très parcellaires ;
- surestimation des surfaces irriguées par télédétection ;

- surestimation des besoins en eau des périmètres rizicoles par le logiciel CROPWAT dans le contexte des moyennes et hautes terres du Vietnam ;
- sous-estimation du pourcentage des eaux agricoles, industrielles et domestiques immédiatement restituées au système hydrologique après usage ;
- sous-estimation du nombre et du volume effectif des réservoirs.

Notons néanmoins qu'elles pourraient aussi avoir été sous-estimées pour les raisons suivantes :

- surestimation de l'efficacité de l'irrigation à Thai Nguyen ;
- sous-estimation des surfaces de Bac Giang irriguées à partir du réservoir de Nui Coc et du Song Cong ;
- augmentation de la variabilité saisonnière du régime hydrologique du fait du déboisement non reflétée dans les données disponibles ;
- réduction de la capacité de stockage des réservoirs par sédimentation ;
- maintenance insuffisante des réservoirs et diminution progressive de leur capacité de stockage. Du fait de moyens humains et financiers insuffisant pour assurer une maintenance effective des ouvrages, de nombreux réservoirs en milieu rural se sont rapidement dégradés et ne conservent que le tiers ou la moitié de leur volume effectif théorique (M. Silver, 1999).

Il est trop souvent d'usage à la conclusion de toute analyse de données de recommander des études supplémentaires pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus et développer de façon plus approfondie des points précis. Compte tenu de l'importance de la ressource en eau pour le développement durable et des incertitudes existantes concernant cette ressource, nous ne dérogerons cependant pas à l'usage et recommandons un tel programme de suivi des ressources en eau dans les provinces pilotes.

Une bonne connaissance des ressources en eau et de leurs usages à Thai Nguyen est indispensable pour permettre une restitution des volumes d'eau stockés par les réservoirs existants en accord avec les fluctuations de la demande agricole, gérer au mieux le partage de cette ressource entre les différents usagers et éviter qu'une exploitation non durable ne se traduise par une dégradation de la qualité de l'eau et une réduction de la diversité et de la productivité du milieu aquatique.

La majorité des efforts en matière de protection de l'environnement à Thai Nguyen se porte actuellement sur la lutte contre l'érosion des sols, somme toute assez réduite. Sur la base des données disponibles, il existe un risque non négligeable que l'importance de la conservation de la ressource en eau pour le développement durable de la province ne soit par contre sous-estimée.

4.4 INDICATEURS DE POLLUTION DE L'EAU

4.4.1 Indicateur de risque de pollution de l'eau

Indicateur sélectionné : *émission de rejets polluants*

4.4.1.1 Présentation des résultats

La carte 41 présente la distribution des risques de contamination fécale obtenue par croisement de la densité de population et des pratiques sanitaires. En accord avec l'étude de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement à Thai Nguyen conduite par DANIDA et le CERPAD (1997), la distribution géographique suivante des pratiques sanitaires fut retenue pour l'agrégation de l'indice de risque de contamination fécale :

- latrines à double fosse et un faible nombre de fosses septiques en milieu urbain ;
- latrines à simple fosse en milieu rural, dans les zones de plaine et basses collines ;
- défécation en plein air et un faible nombre de latrines à fosse unique dans les hautes terres.

4.4.1.2 Analyse des résultats

Un risque modéré mais non négligeable de contamination fécale. Il existe sur l'ensemble du cours de la rivière Cau. Ce risque est fort à très fort dans les districts de Thai Nguyen et de Pho Yen. Les zones de montagnes semblent relativement protégées malgré les pratiques de défécation en plein air, du fait de la faible densité de la population.

Importance du maintien d'un débit minimum. Le débit de la rivière Cau atteint plus de 100 m³/s en saison des pluies. Nous pouvons raisonnablement estimer que cette contamination fécale est rapidement assimilée par les eaux de la rivière Cau¹⁹. Pendant cette période, la principale précaution requise serait d'éviter de prélever de l'eau pour l'alimentation humaine directement de la rivière dans les sections à haut risque de Thai Nguyen, Dai Tu, Dinh Hoa et Pho Yen.

Un fort risque de contamination fécale et organique pourrait par contre se poser pendant la période d'étiage quand le débit de la rivière Cau n'est plus que de 10 – 12 m³/s. En l'absence de stations de traitement des eaux, la meilleure protection consistera à maintenir un débit minimum pour préserver la capacité d'assimilation naturelle des eaux de surface.

Utilisation des excréta humains pour l'agriculture. Les excréta humains sont très largement utilisés comme engrais dans le nord du Viet Nam, particulièrement pour les cultures maraîchères. Les excréta humains sont recouverts de cendres et de terre pour réduire les odeurs pendant une période de 1 à 5 mois. Ils sont ensuite épandus juste avant les semis. Ces excréta non compostés sont particulièrement dangereux pour la santé des populations.

Pour refléter l'impact de l'épandage d'excréta humains non compostés sur la contamination fécale des eaux, nous aurions pu considérer que cette pratique équivalait à une défécation en plein air. Un risque de contamination fécale moyen à fort eut été obtenu dans ce cas sur l'ensemble du cours des rivières Cau et Cong. Nous garderons à l'esprit cette question dans notre analyse de l'état de pollution des eaux.

4.4.2 Indicateur d'état de la pollution de l'eau

4.4.2.1 Présentation des résultats

Le tableau 65 nous donne l'incidence annuelle des diarrhées par district à Thai Nguyen de 1996 à 1998. En accord avec ces résultats, la carte 42 représente l'état de contamination fécale chez les enfants de moins de 5 ans à Thai Nguyen. Nous avons choisi d'indiquer sur la carte 42 le taux d'incidence des diarrhées chez les enfants de moins de 5 ans, car il présente une plus grande amplitude que chez le reste de la population. Il permet donc une meilleure analyse spatiale de la contamination fécale dans la province pilote.

¹⁹ UNIDO/Safège estime la consommation de Thai Nguyen à 7.2 m³/s (1994). Même si cette eau devait être retournée au réseau hydrographique avec une DBO de 30 mg/l, cette charge polluante serait immédiatement réduite à 2-3 mg/l par dilution.

Tableau 65 - Incidence des diarrhées à Thai Nguyen de 1996 à 1998 pour les enfants de moins de 5 ans et de plus de 5 ans. (Nbre/100 000 hab./an)

District	Taux d'incidence en 1996		Taux d'incidence en 1997		Taux d'incidence en 1998		Taux d'incidence moyen de 1996 à 1998		Indice d'état de pollution fécale	
	<5 ans	>5ans	<5 ans	>5ans	<5 ans	>5ans	<5 ans	>5ans	<5 ans	>5ans
Dai Tu	794	160	853	407	398	78	682	215	2	1
Dinh Hoa	439	206	717	142	586	216	581	188	2	1
Dong Hy	1 349	614	1 293	565	2 226	704	1 623	628	3	2
Pho Yen	2 377	561	1 750	478	1 906	6	2 011	348	4	1
Phu Binh	1 541	352	1 021	488	1 466	339	1 343	393	3	1
Phu Luong	889	395	1 015	465	877	487	927	449	2	1
TP Thai Nguyen	1 610	229	1 488	338	654	262	1 251	276	3	1
TX Song Cong	1 113	462	2 171	485	1 580	533	1 622	493	4	1
Vo Nhai	2 346	560	1 269	531	964	562	1 526	551	4	2
Total	1 351	358	1 179	397	1 127	393	1 211	383	3	1

Source : Service provincial de la santé de Thai Nguyen (août 1999).

DANIDA et le CERPAD mentionnent des différences de qualité importantes dans la fiabilité des statistiques de santé publique au niveau provincial. Afin de mettre en perspective ces chiffres de diarrhées, la carte 43 représente l'incidence des vers intestinaux au Viet Nam. Ces taux d'incidence ont été déterminés par une étude parasitologique conduite par l'UNICEF et l'Institut National de Nutrition (1995). Les taux d'incidence en vers intestinaux sont directement liés aux pratiques sanitaires et constituent un excellent indicateur supplémentaire de contamination fécale (RRDM, *Public Health*, 1995).

4.4.2.2 Analyse des résultats

Des résultats contradictoires. Le taux moyen d'incidence des diarrhées à Thai Nguyen de 1996 à 1998 était de 1 211 pour 100 000 habitants pour les enfants de moins de 5 ans et de 383 pour 100 000 habitants pour le reste de la population. Ce second taux, très fortement en dessous de la moyenne nationale de 1 327 (1995) indiquerait une contamination fécale des eaux très faible. Ce résultat signifierait que la capacité d'assimilation des eaux des rivières Cau et Cong est suffisamment forte et que les systèmes d'alimentation en eau potable sont suffisamment fiables pour réduire substantiellement l'impact de la contamination fécale dans les zones à forte densité de population à Thai Nguyen.

Ce résultat diffère fortement de celui donné par l'analyse parasitologique conduite par l'UNICEF et l'Institut National de Nutrition (1995). Cette étude parasitologique a déterminé un taux de présence à 80,6 % de l'ankylostome (*hookworm*) dans la population test de Bac Thai (ancienne province réunissant les provinces de Thai Nguyen et Bac Kan). Il s'agit du second taux le plus fort, déterminé au Viet Nam après la province de Ha Tinh. L'UNICEF et l'Institut National de Nutrition (1995) expliquent en partie ce très fort taux d'infection par l'utilisation des excréta humains pour l'agriculture dans le nord du Viet Nam. Ce point militerait pour une incorporation de cette pratique agricole dans l'agrégation de l'indice de risque de contamination fécale. Sur la base de cette étude parasitologique, la contamination fécale de l'eau à Thai Nguyen serait non pas très faible (indice 1) mais très forte (indice 5).

Risque et état de pollution. En accord avec l'analyse du risque de contamination fécale de l'eau, les taux d'incidence les plus élevés de diarrhées chez les enfants de moins de 5 ans se rencontrent dans les districts de plaines de Pho Yen, Song Cong et Phu Binh. Notons néanmoins un taux d'incidence des diarrhées moins élevé que prévu pour le district urbain de Thai Nguyen. Le taux d'incidence des diarrhées à Thai Nguyen a très fortement chuté, passant de 1 610 cas pour 100 000 habitants en 1996 à 654 cas en 1998. Ce résultat pourrait être attribuable à une récente amélioration du réseau d'approvisionnement en eau et d'assainissement de la ville.

Le taux d'incidence des diarrhées est par contre bien plus élevé que prévu dans le district de Vo Nhai. Malgré une densité de population très faible par rapport à la moyenne provinciale (70 contre 300 hab. /km²), ce taux atteignait 2 346 cas pour 100 000 habitants en 1996. La chute brusque de ce taux à 964 cas pour 100 000 habitants en 1998 en rend l'interprétation difficile. Ce taux originellement très élevé et cette chute brusque pourraient provenir d'une amélioration récente de pratiques d'AEPA particulièrement nocives pour la santé des populations (défécation en plein air à proximité de cours d'eau et de lieux de récréation, lavage limité des mains avant les repas, etc.).

Amélioration du système de suivi de la qualité de l'eau. L'absence d'informations détaillées sur la qualité de l'eau et les réserves existantes quant à la fiabilité des statistiques de santé publique rendent difficile l'analyse des causes et de l'impact de la contamination fécale. Cette absence d'information est préjudiciable pour la santé publique et la préservation des ressources en eau. Elle pourrait se traduire par des investissements lourds pour la mise en place de stations de traitement de l'eau dans des localités où l'assimilation naturelle serait suffisante. Par contre, elle pourrait résulter en une forte exposition de certaines populations à des types de pollution de l'eau, négligés dans les programmes d'investissements publics.

4.4.3 Indicateur de réponse à la pollution de l'eau

4.4.3.1 Présentation des résultats

Nous ne disposons pas de statistiques concernant le pourcentage de la population ayant accès à des services d'alimentation en eau potable et d'assainissement (AEPA) au niveau des districts dans la province de Thai Nguyen. Nous utiliserons donc pour cette analyse les données disponibles au niveau des districts pour le seul programme WATSAN. Les résultats du programme WATSAN pour la province de Thai Nguyen sont représentées sur la carte 44.

4.4.3.2 Analyse des résultats

Un très faible taux de couverture en AEPA : Le taux de couverture moyen en AEPA est de 35 % au Viet Nam. Ce faible taux s'explique par la faible importance donnée aux questions de qualité de l'eau en milieu rural jusqu'à ces dernières années. Près des deux tiers de cette couverture en AEPA ont été mis en place à l'initiative des particuliers. Avec un taux de couverture de 31 %, la province de Thai Nguyen reste dans la moyenne nationale. En accord avec la classification adoptée pour la détermination de l'indice de réponse à la contamination fécale en 3.4.3, la province de Thai Nguyen obtient donc un résultat de « 3 » en matière de réponse à la pollution de l'eau.

Un programme d'aide basé sur des critères socio-économiques. La carte de réponse à la contamination fécale n'est que faiblement corrélée à la carte de risque de contamination fécale. À l'exception du district de Vo Nhai, le programme WATSAN semble porter son attention sur les districts les moins exposés au risque de contamination fécale. Ce paradoxe pourrait s'expliquer par une sélection des districts bénéficiaires du programme WATSAN sur la base de critères socio-économiques. Or, les districts les plus pauvres ne sont pas forcément les plus exposés à une contamination fécale. Ce point illustre l'importance d'un suivi de la qualité de l'eau pour définir les programmes d'investissements publics en fonction à la fois de critères socio-économiques et du risque de contamination.

CONCLUSION

L'étude de cas de la province de Thai Nguyen confirme l'intérêt des indicateurs d'environnement comme instruments de traitement de l'information pour une mise en valeur durable des hautes terres tropicales. Ils permettent d'analyser, de hiérarchiser et de synthétiser de grandes quantités de données biologiques, physiques et socio-économiques en quelques cartes et chiffres directement pertinents pour la prise de décision. Le tableau 66 présente les résultats obtenus pour les 12 indicateurs composites STRESS dans la province pilote de Thai Nguyen.

Tableau 66 - Résultats obtenus dans la détermination des indicateurs d'environnement

Indicateurs d'environnement	Pression de très faible (1) à très forte (5)	État De très bon (1) à très critique(5)	Réponse de très forte (1) à très faible (5)
Dégradation des forêts	5	5	4
Érosion des sols	3	2	2
Pénurie en eau	3	3	3
Pollution des eaux	2	1 ou 5	3
Indice global	3	3 ou 4	3

L'élaboration d'indicateurs de risque, d'état et de réponse pour chaque compartiment de l'environnement suivant le cadre conceptuel STRESS permet de présenter aux décideurs une approche dynamique de l'environnement. Ils mettent ainsi en évidence la chaîne de causalité qui unit les mécanismes de dégradation et de régénération des hautes terres tropicales et facilitent la sensibilisation des décideurs à la fragilité et aux contraintes de développement d'un écosystème trop souvent perçu comme riche et sous-exploité.

De par leur ambition à représenter l'ensemble des interactions environnementales, les indicateurs d'environnement STRESS permettent aussi de structurer l'exploitation des informations. En obligeant le gestionnaire de l'environnement à collecter et à analyser un minimum d'information pour chaque compartiment de l'environnement, ils évitent qu'un problème environnemental critique ne soit ignoré du fait d'idées préconçues quant à son importance. Ainsi, les problèmes possibles de pénurie en eau mis en évidence lors de l'élaboration des indices de dégradation des eaux étaient relativement inattendus dans ce pays de mousson. Ils auraient pu être ignorés lors d'une exploitation plus libre des données.

L'étude de cas de Thai Nguyen confirme aussi l'hypothèse initiale de ce travail, c'est-à-dire l'intérêt d'associer des indicateurs d'environnement à la base de données géographique sur les ressources naturelles pour faciliter la communication des données à un public de non-spécialistes. En effet, l'association de ces deux types d'outils permet :

- de fournir aux décideurs une représentation spatiale des conditions de l'environnement. Il est plus facile de communiquer une information complexe à partir de cartes que de tableaux ou de listes, car elles utilisent pleinement notre aptitude naturelle à distinguer les couleurs, formes et relations spatiales. De plus, les décideurs interprètent généralement plus facilement des données analogiques que des données digitales, car ils peuvent "voir" les données analogiques ;
- de rendre transparentes les différentes hypothèses retenues pour l'établissement des indicateurs d'environnement. Une modification des hypothèses d'agrégation se traduira immédiatement sous la forme de nouvelles représentations spatiales directement compréhensibles par des décideurs. Ces possibilités d'interaction sont particulièrement adaptées à la complexité des processus décisionnels ;

- d'amorcer un dialogue entre décideurs et analystes. Les indicateurs composites ont un fort pouvoir d'attraction et captent plus aisément l'attention des décideurs que des données brutes. De par ce pouvoir d'attraction, les indicateurs composites donnent à l'analyste une opportunité de démontrer la puissance et l'intérêt d'un SIG pour l'aide à la décision.

L'étude de cas de Thai Nguyen met aussi en évidence la sensibilité des indicateurs d'environnement au choix des paramètres et à la qualité de l'information qui les composent. Ainsi, le choix du taux d'incidence des diarrhées comme indicateur pour la contamination fécale de l'eau nous donne un indice d'état de la qualité de l'eau de « 1 » alors que celui des vers intestinaux nous aurait donné un résultat de « 5 ». Ces résultats contradictoires s'expliquent en partie par des procédures différentes de collecte de l'information. Dans un cas, les données ont été collectées et directement transmises aux administrations centrales par les responsables locaux sans autre forme de vérification. Dans l'autre, elles ont été obtenues au travers d'un programme de mesures directes de terrain par des organismes indépendants. Une telle différence de résultat se traduit par un indice d'état global de l'environnement de « 3 » dans un cas et de « 4 » dans l'autre pour la province de Thai Nguyen.

L'absence d'information détaillée sur certaines composantes fondamentales de l'environnement comme la biodiversité ou les ressources en eau est une contrainte majeure pour l'élaboration d'indicateurs d'environnement suffisamment fiables pour la prise de décision à Thai Nguyen. Comme cela a été souligné lors des trois séminaires organisés par la Banque Asiatique de Développement (ADB) à Shanghaï, Dhaka et Manille en 1998 pour évaluer l'impact de ses récents travaux en matière de développement d'indicateurs d'environnement, le commentaire ci-dessous semble s'appliquer à de nombreux pays en voie de développement :

« For most Asian countries, environmental information is generally lacking. When it does exist, it is often regarded as the property of individual government agencies, institutions and individuals ».

Dans la plupart des pays de l'OCDE, les débats sur la validité des indicateurs d'environnement comme instruments d'aide à la décision se sont essentiellement portés sur les incertitudes et la subjectivité associées à la détermination des seuils de dégradation et à la pondération des différents paramètres dans les équations d'agrégation. Il est intéressant de noter que lors des trois séminaires de l'ADB les discussions se sont au contraire concentrées sur la sélection des indicateurs et la disponibilité des données nécessaires pour leur agrégation. La sélection d'indicateurs d'environnement communément utilisés dans les pays de l'OCDE comme la consommation énergétique et l'utilisation d'engrais par habitant pour refléter la problématique des pays en voie de développement fut ainsi contesté. Des indicateurs d'environnement pour les hautes terres tropicales devront répondre aux besoins spécifiques de ces écosystèmes et prendre en compte les limitations critiques en information.

Ce vide informatif se fera sentir de façon différente suivant les compartiments de l'environnement. Les progrès en matière de télédétection rendent possible un suivi assez fiable de l'évolution du couvert végétal et, par là même, le développement d'indicateurs de dégradation des forêts suffisamment robustes pour la prise de décision. La possibilité de calibrer des modèles d'érosion des sols à partir d'un nombre limité de données et de conduire des enquêtes de terrain complémentaires par des pédologues confirmés permet aussi une estimation acceptable du risque et de l'état de dégradation des sols. Par contre, l'élaboration d'indicateurs de dégradation des eaux dépendra essentiellement de la qualité des informations hydrométéorologiques disponibles et des politiques de communication de ces données au public. Une analyse hydrologique exige des mesures sur de longues périodes de temps et sur un grand nombre de sites. Ces données ne peuvent être collectées de façon *ad hoc* pour répondre aux besoins d'un programme spécifique. De plus, le monopole de collecte d'information dont dispose de nombreux services hydrométéorologiques dans les pays en voie de développement exclut toute possibilité de vérification indépendante des données.

Lors de l'utilisation des indicateurs d'environnement pour les hautes terres tropicales proposés dans ce document, il conviendra de garder en mémoire l'absence bien souvent d'informations détaillées et fiables

sur de nombreux compartiments d'environnement ainsi que les incertitudes et la subjectivité associées à la sélection et à la pondération des différents paramètres qui les constituent. Du fait de ces limites, les indicateurs devront être regardés comme seulement un des outils nécessaires de traitement de l'information. Ils devront être complétés par d'autres informations qualitatives et scientifiques pour éviter les risques de mauvaise interprétation.

En dépit de ces contraintes, l'intérêt certain des indicateurs en matière de communication de l'information et de sensibilisation des décideurs milite fortement en faveur d'un approfondissement de ces travaux et de leur transposition aux deux autres provinces pilotes. Une telle transposition permettra aux décideurs vietnamiens de comparer la performance environnementale des différentes provinces et de promouvoir les initiatives les plus prometteuses en matière de développement durable.

Afin de faciliter cette transposition, des compléments d'études sur la biodiversité des écosystèmes et la qualité des ressources en eau des provinces pilotes sont recommandés. De tels compléments d'études sur la biodiversité permettraient de considérer la dégradation des forêts dans son ensemble et non seulement la déforestation des forêts non perturbées susceptibles d'abriter une forte biodiversité. Des mesures ponctuelles des coliformes fécaux ou de la demande biologique en oxygène des principaux cours d'eau des provinces pilotes pendant les périodes de crues et d'étiage mettraient en perspective les informations fournies par les indicateurs de substitution proposés pour la qualité des eaux, et permettraient d'affiner leur agrégation.

Enfin, une prolongation à moyen terme de ces travaux en matière de développement d'indicateurs d'environnement pourrait inclure une quantification monétaire de la dégradation de hautes terres tropicales. Alors que les gestionnaires de l'environnement sont habitués à manier des unités physiques, les décideurs politiques travaillent essentiellement sur des unités monétaires. De plus, une telle approche permettrait de corriger en partie les "préjugés statistiques" associés aux indicateurs macro-économiques comme le PNB.

Annexe I : Cartes

Carte 1 : Localisation de la province pilote de Thai Nguyen.....	121
Carte 2 : Carte de la population de Thai Nguyen.....	122
Carte 3 : Carte topographique de Thai Nguyen	123
Carte 4 : Occupation du sol	124
Carte 5 : Répartition des différents types de végétation	125
Carte 6 : Localisation des forêts peu ou pas perturbées	126
Carte 7 : Distribution des sols (d'après la carte morpho-pédologique).....	127
Carte 8 : Localisation des stations hydrologiques	128
Carte 9 : Population ayant accès à des services d'alimentation en eau potable et d'assainissement au Viet Nam (en %).....	129
Carte 10 : Pourcentage de la population couverte par le programme WATSAN.....	130
Carte 11 : Localisation des forêts en 1943	131
Carte 12 : Localisation des forêts en 1983	132
Carte 13 : Localisation des forêts en 1993	133
Carte 14 : Variations du couvert forestier 1943-1993	134
Carte 15 : Variations du couvert forestier 1943-1983	135
Carte 16 : Variations du couvert forestier 1983-1993	136
Carte 17 : Taux annuel de déforestation entre 1943 et 1993, par district	137
Carte 18 : Taux annuel de déforestation entre 1943 et 1983, par district	138
Carte 19 : Taux annuel de déforestation entre 1983 et 1993, par district	139
Carte 20 : comparaison des forêts de Thai Nguyen, identifiées par le FIPI et par le Programme STD.....	140
Carte 21 : Relation entre la topographie et la localisation des forêts	141
Carte 22 - Influence de la distribution de l'habitat, du réseau routier et du réseau hydrographique sur la déforestation de Thai Nguyen.....	142
Carte 23 : Influence de la distribution de l'habitat, du réseau routier et du réseau hydrographique sur la déforestation à Vo Nhai.....	143
Carte 24 : Indicateur de dimension des zones forestières	144
Carte 25 : Indicateur de compacité des forêts	145
Carte 26 : Indice d'état de fragilité des forêts (Taille / compacité : 3).....	146
Carte 27 : Indice d'état de fragilité des forêts (Taille / compacité : 4).....	147
Carte 28 : Aforestation par district (situation en 1993).....	148
Carte 29 : Reboisement, par district.....	149
Carte 30 : Indice de reboisement en 1993, par district	150
Carte 31 : Influence de la pente sur le risque d'érosion du sol.....	151

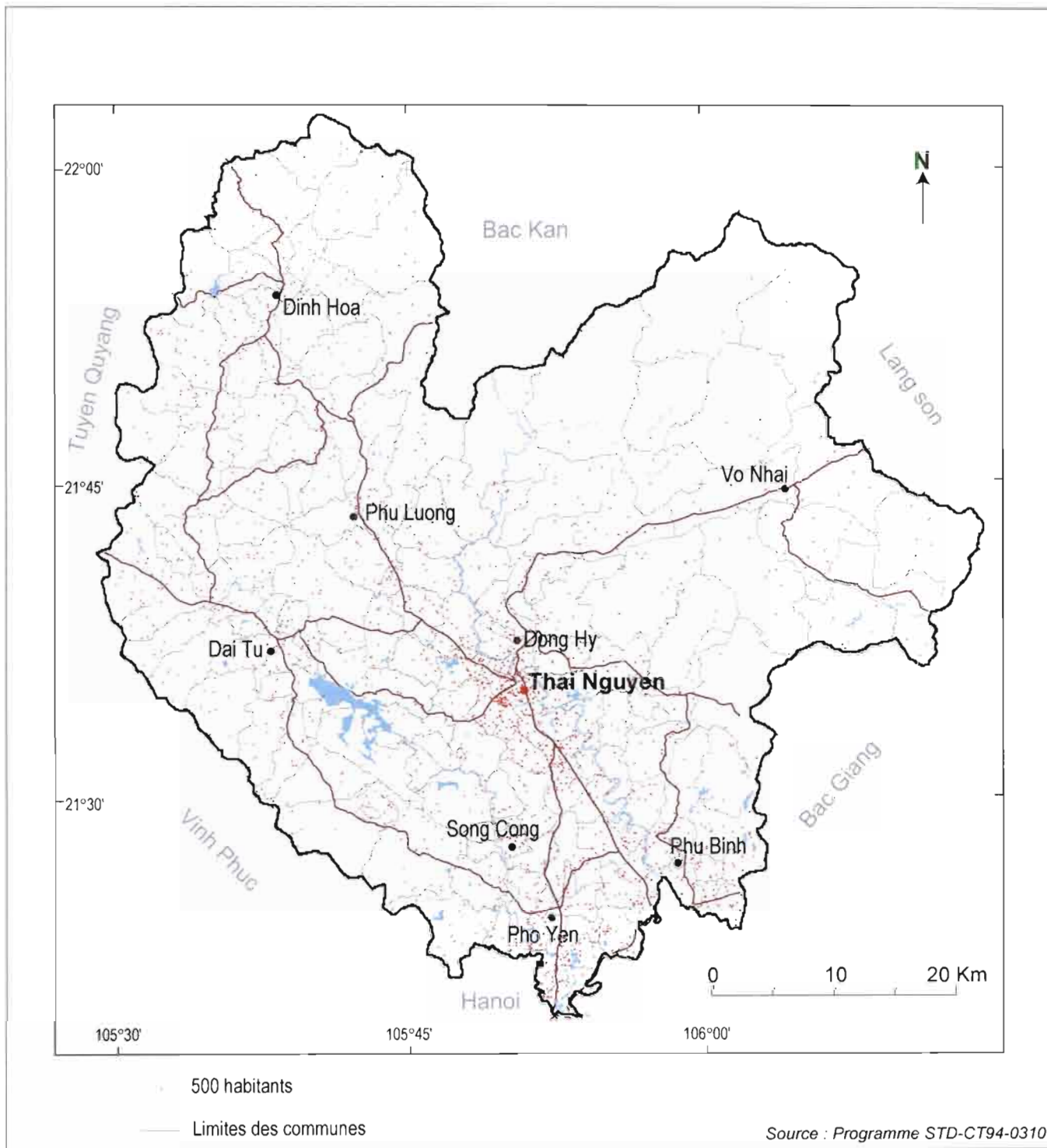
Carte 32 : Influence de la morpho-pédologie sur la sensibilité du sol à l'érosion	152
Carte 33 : Influence de la pluviométrie sur le risque d'érosion du sol	153
Carte 34 : Vulnérabilité inhérente des sols à l'érosion.....	154
Carte 35 : Influence de l'occupation des sols sur l'érosion	155
Carte 36 : Indice de risque d'érosion des sols.....	156
Carte 37 : Etat d'érosion hydrique des sols	157
Carte 38 : Etat de dégradation des sols (érosion hydrique et/ou dégradation <i>in situ</i>)	158
Carte 39 : Limites des bassins versants des rivières Cau et Cong	159
Carte 40 : Bassin de la rivière Cau dans les provinces de Thai Nguyen et de Bac Kan.....	160
Carte 41 : Indice de risque de contamination fécale de l'eau	161
Carte 42 : Indicateur d'état de la contamination fécale, par district.....	162
Carte 43 : Incidence des vers intestinaux au Viet Nam.....	163
Carte 44 : Indice de réponse à la contamination fécale.....	164

**Carte 1 : Localisation de la province pilote
de Thai Nguyen**

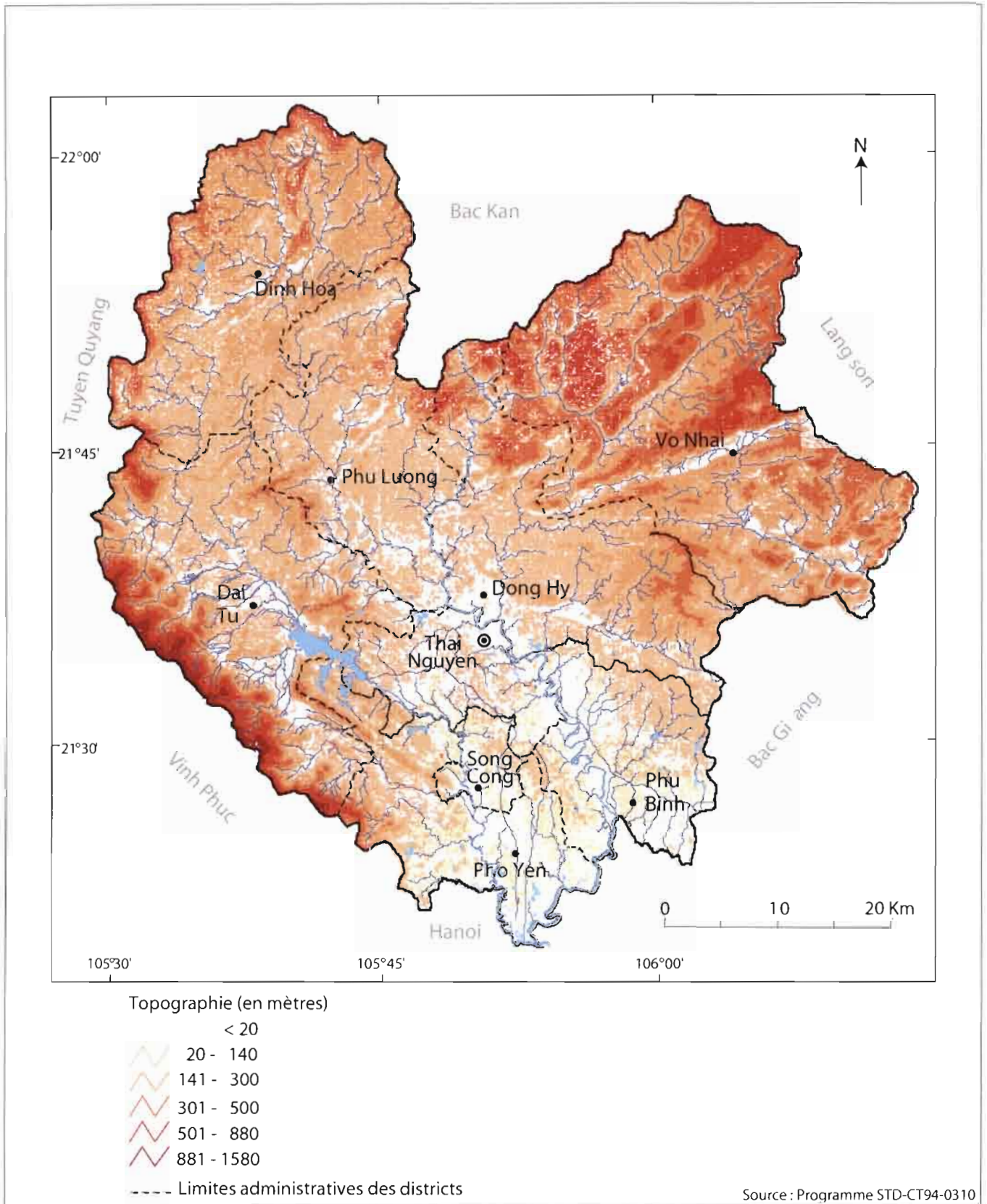


Sources : d'après Brabant et al. 1997

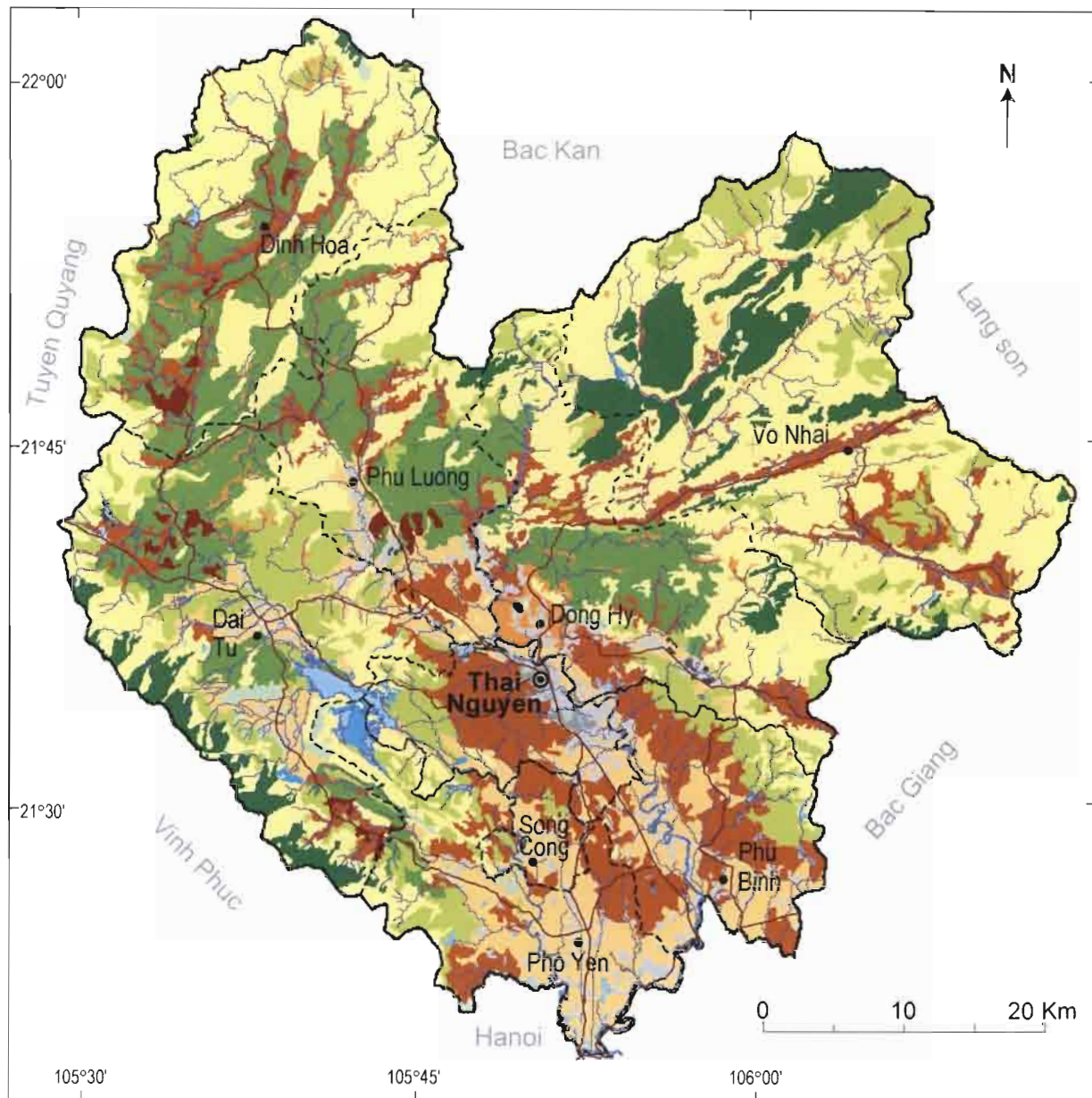
Carte 2 : Carte de la population de Thai Nguyen



Carte 3 : Carte topographique de Thai Nguyen



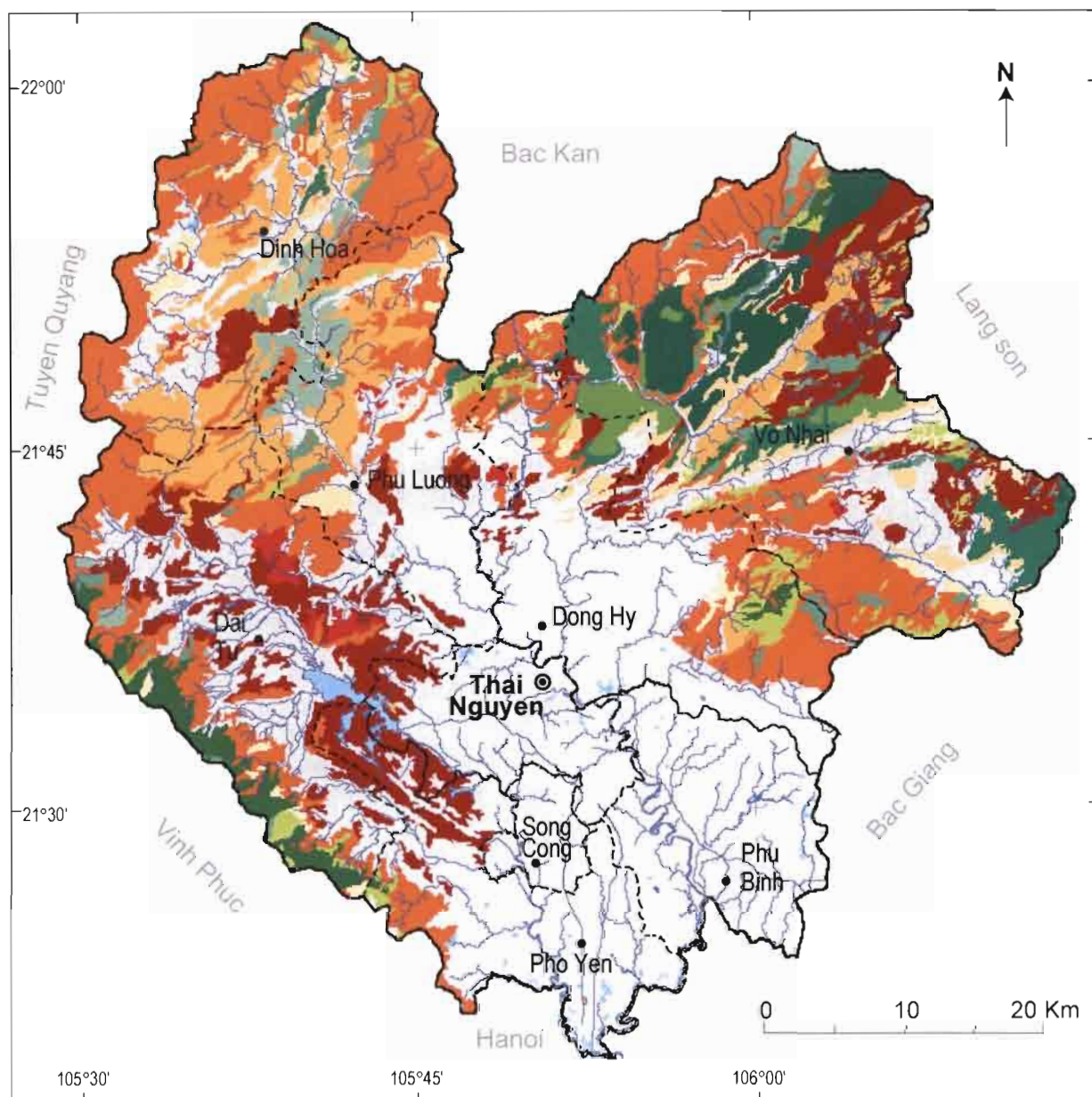
Carte 4 : Occupation du sol de Thai Nguyen



- Zone à agriculture pluviale et irriguée, à productions végétales dominantes
- Zone à agriculture pluviale et irriguée, à productions diverses
- Zone à agriculture irriguée dans les vallées de montagne
- Zone à agriculture irriguée dans les plaines
- Agriculture récurrente, cultures et jachères couvrant de 5% à 25% du terrain
- Agriculture récurrente, cultures et jachères couvrant de 25% à 75% du terrain
- Mosaïque de terres agricoles et forestières, dominance de cultures pérennes
- Mosaïque de terres agricoles et forestières, dominance des plantations forestières et des friches
- Végétation herbacée
- Forêt dense à larges feuilles, sempervirentes ou semi-décidue
- Habitat rural avec de nombreux jardins
- Habitat urbain continu
- Exploitation minière à ciel ouvert
- Surfaces en eau
- Limites administratives des districts

Source : Programme STD-CT94-0310

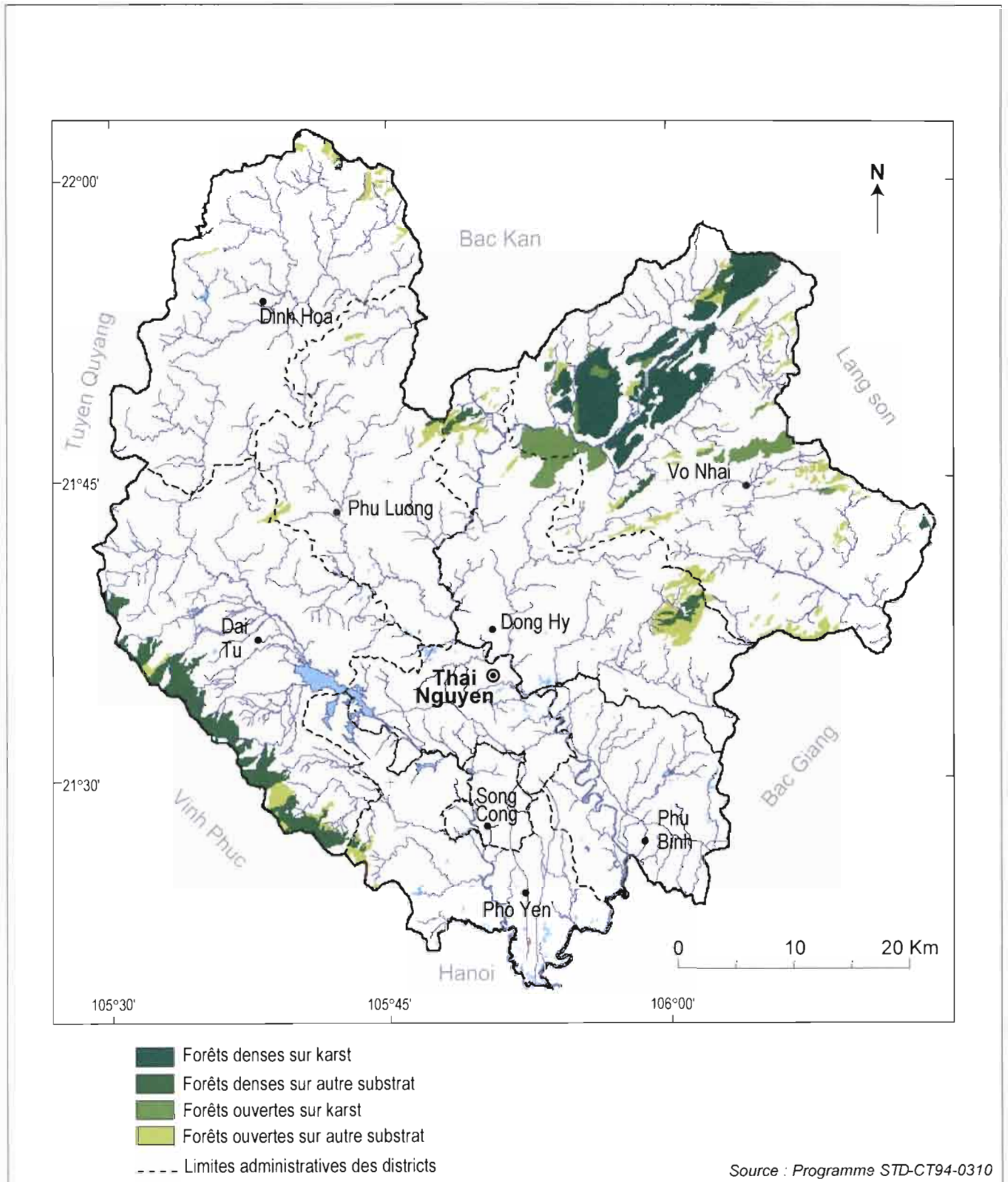
Carte 5 : Répartition des différents types de végétation de Thai Nguyen



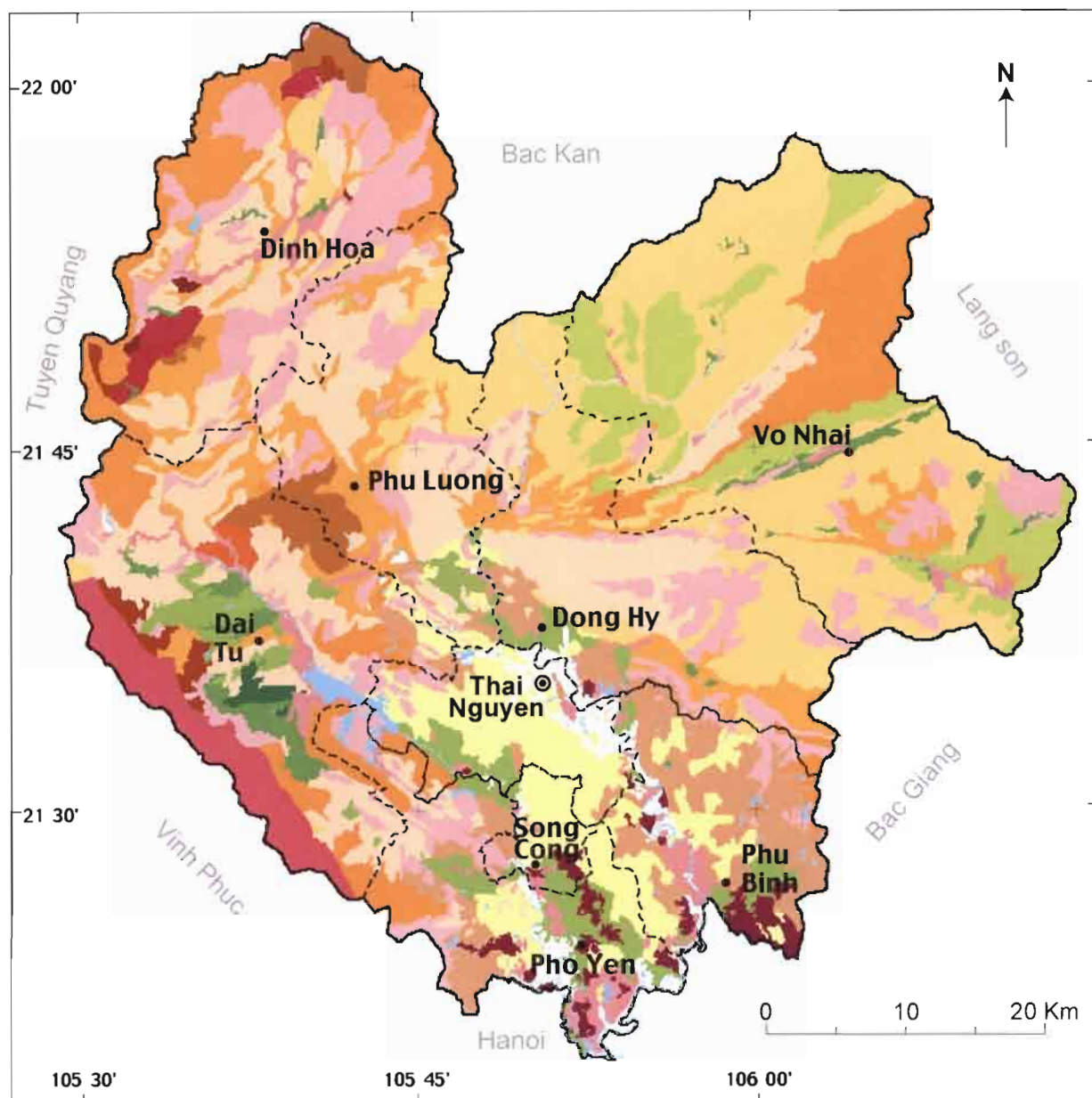
- Terrains agricoles
- Forêt dense
- Forêt dense sur karst
- Forêt ouverte
- Forêt ouverte sur karst
- Forêt ouverte et broussailles boisées
- Forêt ouverte et broussailles boisées sur karst
- Forêt ouverte et broussailles boisées avec mosaïques de plantations
- Forêt ouverte avec mosaïque de plantations
- Plantations
- Broussailles boisées et fourrés
- Broussailles boisées et fourrés sur karst
- Broussailles boisées et fourrés avec mosaïques de plantations
- Fourrés sur karst
- Fourrés et broussailles
- Fourrés et broussailles avec mosaïques de plantations
- Limites administratives des districts

Source : Programme STD-CT94-0310

Carte 6 : Localisation des forêts peu ou pas perturbées de Thai Nguyen



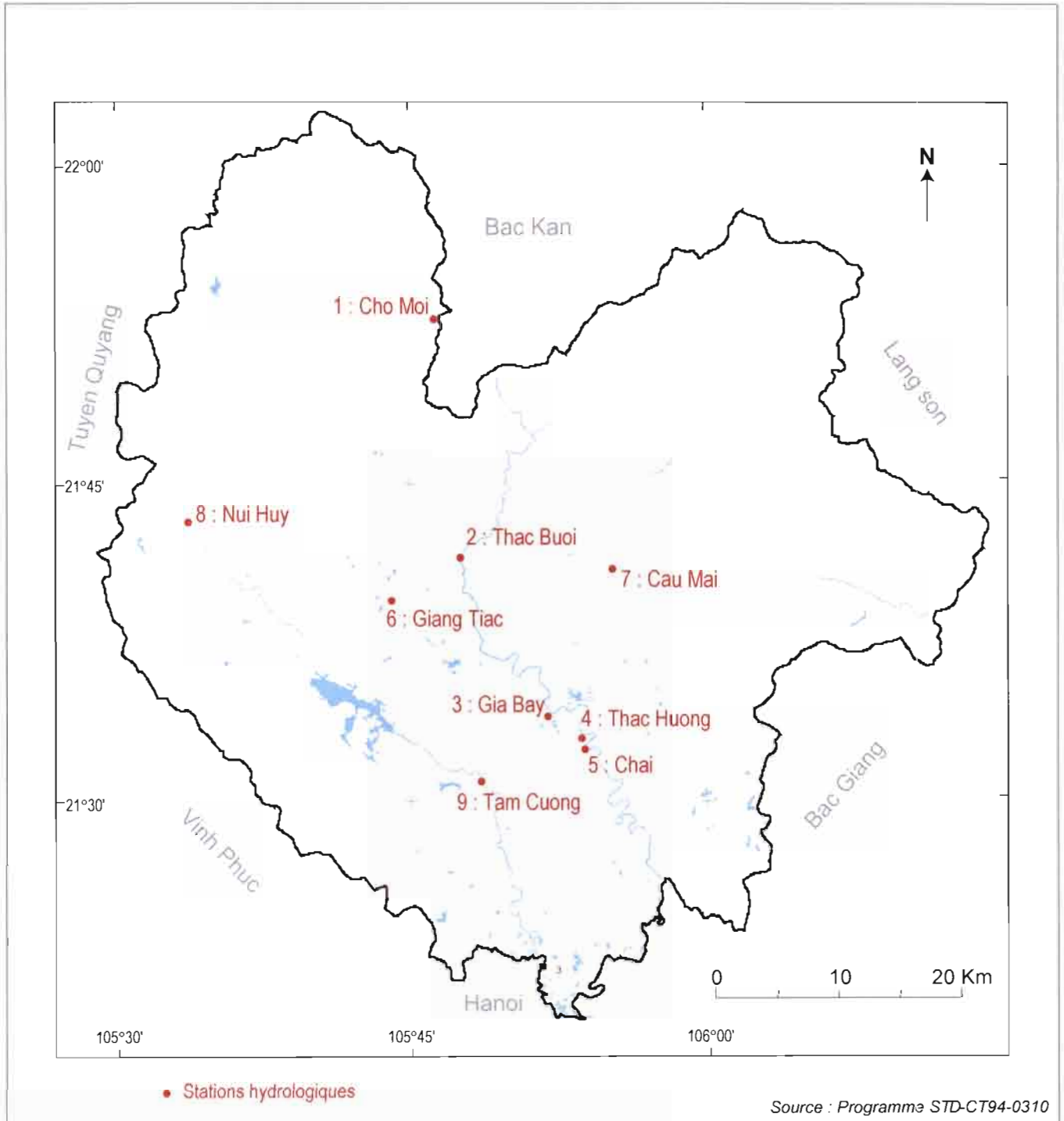
Carte 7 : Distribution des sols de Thai Nguyen (d'après la carte morpho-pédologique)



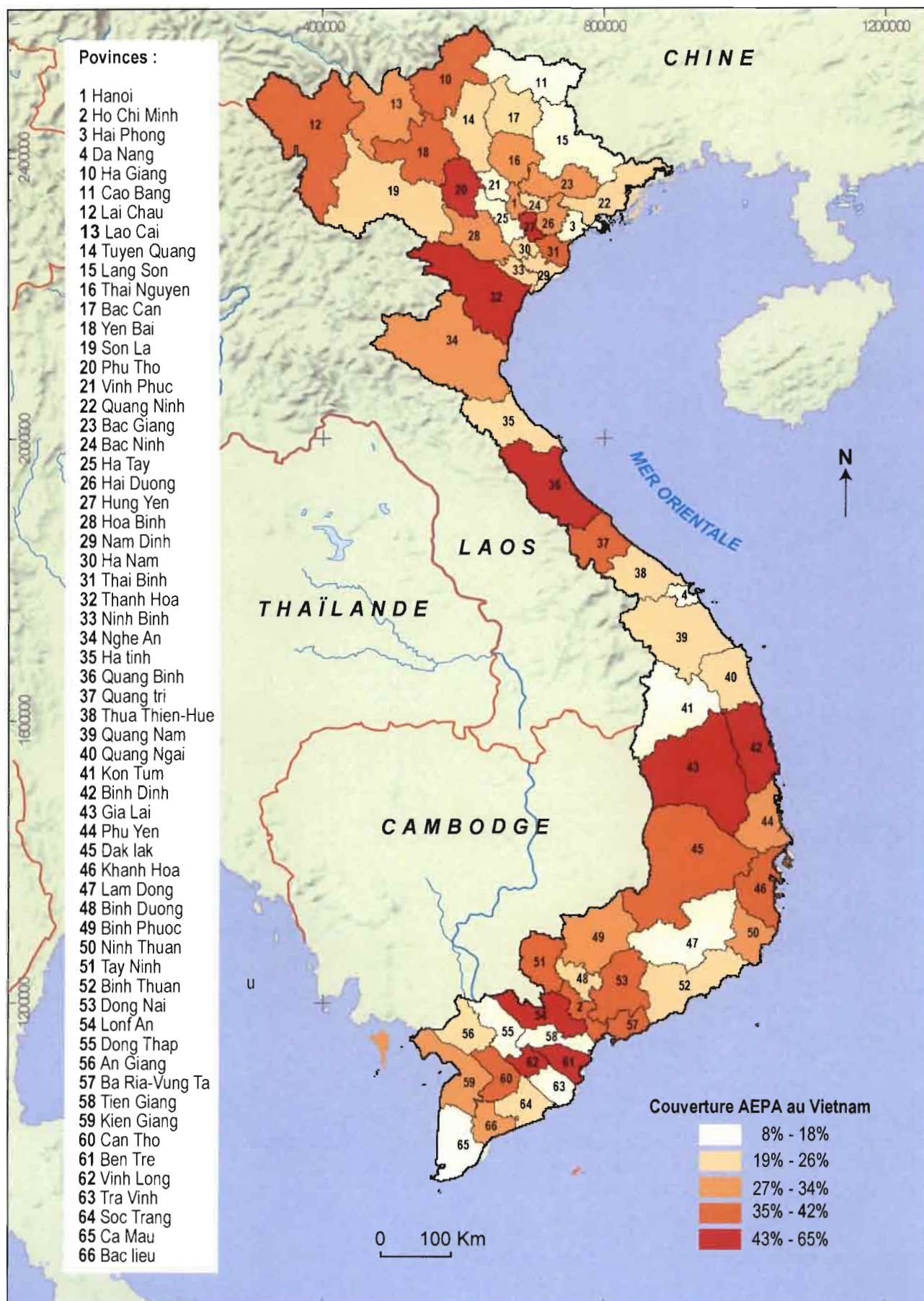
- Anthrosols cumuliques, fluvisols eutriques
- Acrisols hapliques, ferralsols xanthiques, cambisols dystriques
- Collines : Acrisols hapliques, cambisols dystriques. Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Collines : Cambisols dystriques, acrisols hapliques, Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Collines : Cambisols dystriques, leptosols dystriques, acrisols hapliques
- Collines : Cambisols dystriques, leptosols dystriques. Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Collines : Cambisols dystriques, alisols ferriques. Bas-fond : luvisols eutriques
- Collines : Acrisols ferriques et hapliques, leptosols dystriques. Bas-fonds : luvisols eutriques
- Collines : Cambisols ferraliques, acrisols hapliques. Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Collines : Ferralsols hapliques, acrisols hapliques. Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Collines : Leptosols dystriques, acrisols ferriques et hapliques. Bas-fonds : fluvisols eutriques
- Fluvisols eutriques
- Leptosols dystriques, cambisols humiques, cambisols ferraliques, cambisols dystriques
- Leptosols dystriques, leptosols umbriques
- Leptosols dystriques, cambisols ferraliques, alisols hapliques, phaeozems hapliques, lithosols
- Lithosols, phaeozems calcaires, lixisols hapliques
- Régosols eutriques, cambisols dystriques
- Cambisols ferraliques
- Cambisols ferraliques, boulders
- Limites administratives des districts

Source : Programme STD-CT94-0310

Carte 8 : Localisation des stations hydrologiques de Thai Nguyen

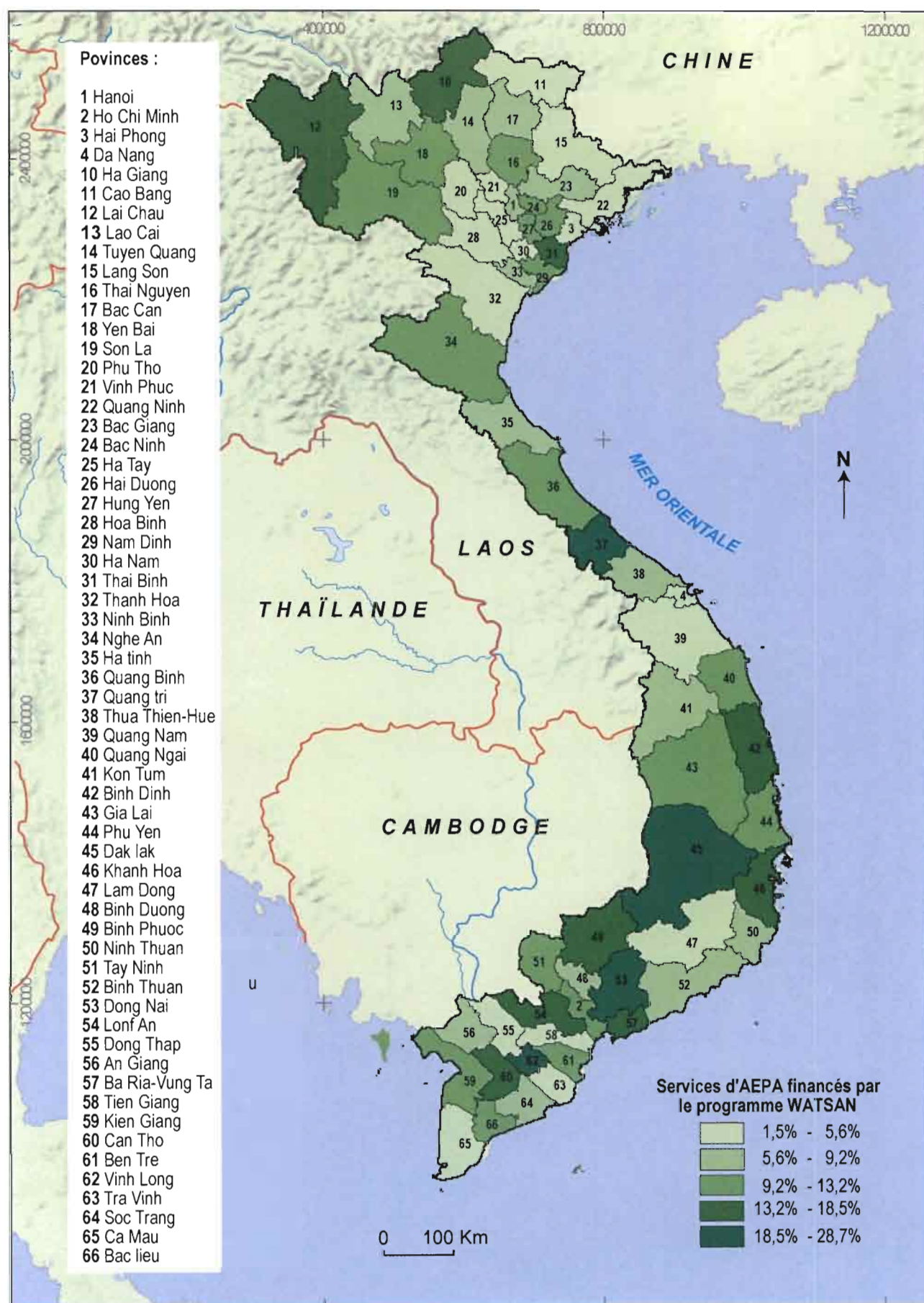


Carte 9 : Population ayant accès à des services d'eau potable et d'assainissement au Vietnam



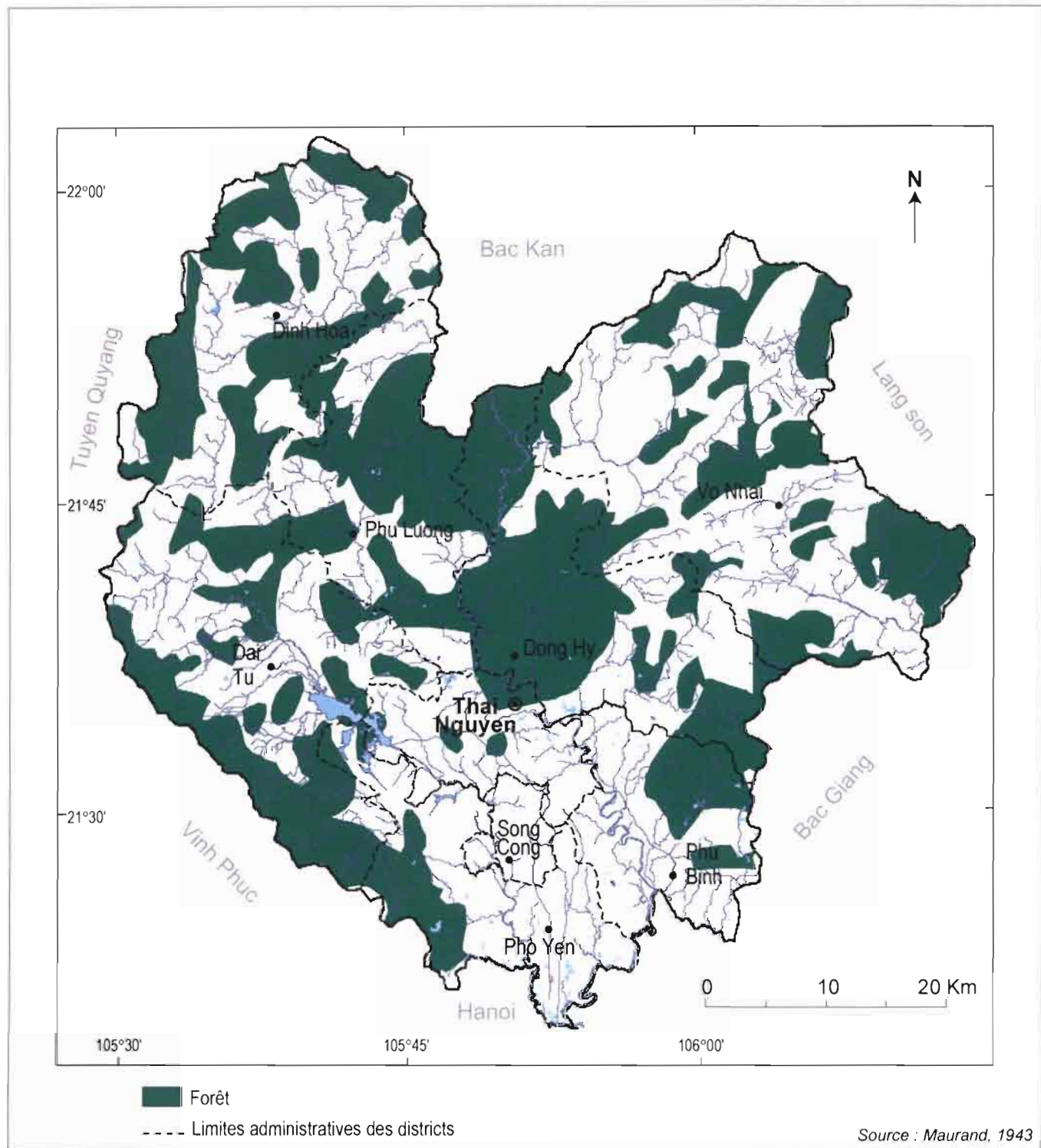
Source : UNICEF - 1999

**Carte 10 : Pourcentage de la population couverte
par le programme WATSAN**

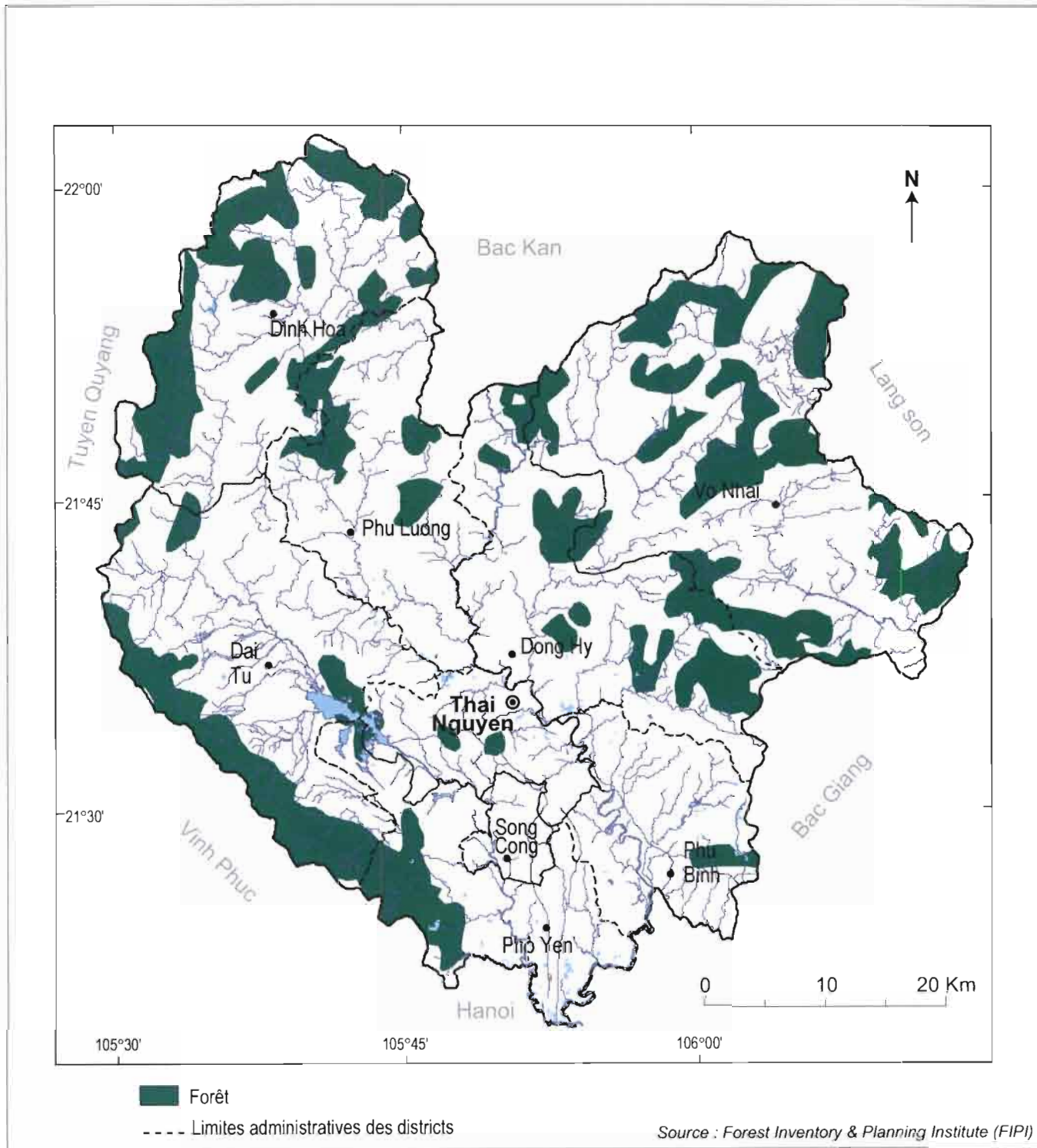


Source : UNICEF - 1999

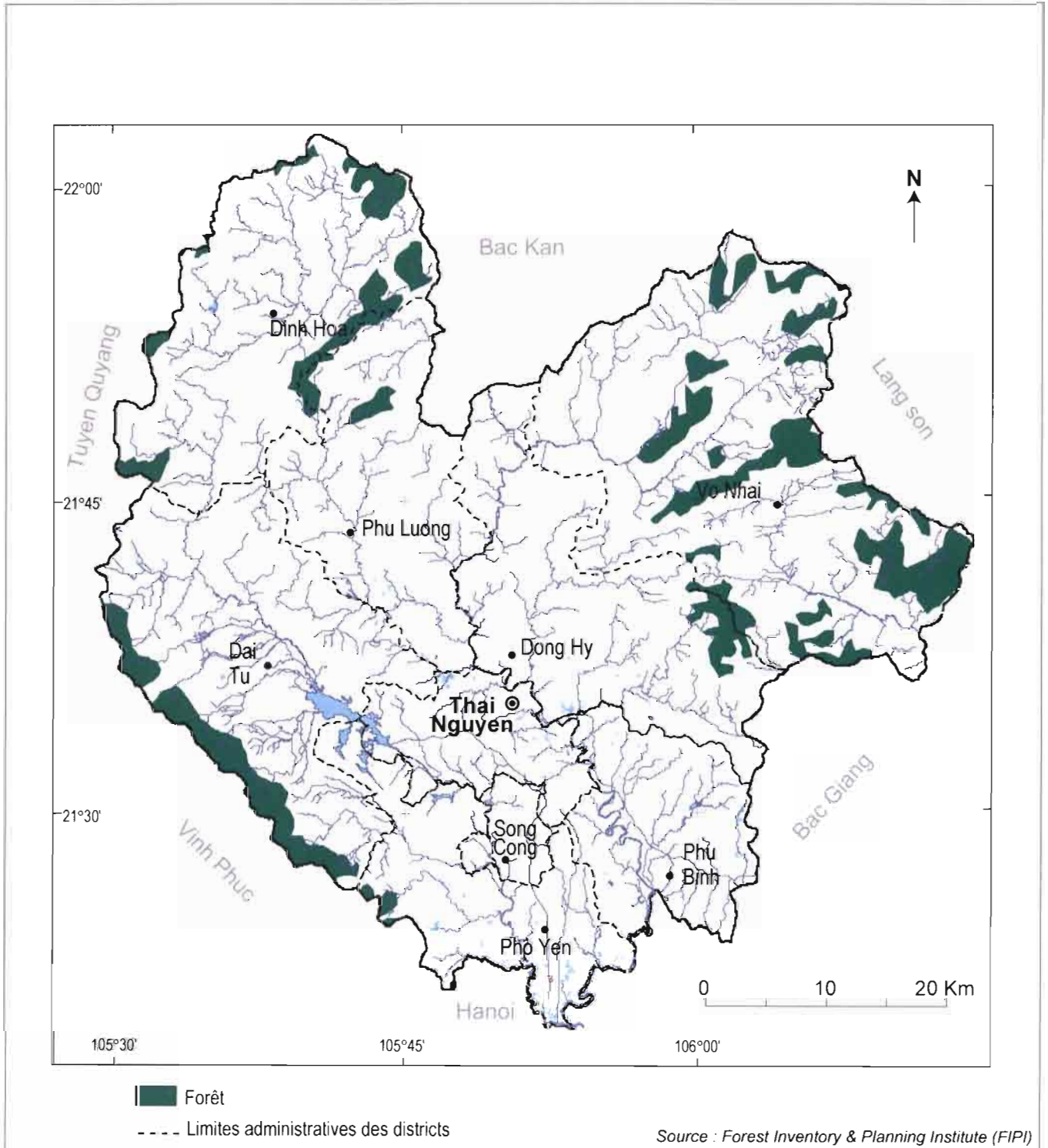
Carte 11 : Localisation des forêts de Thai Nguyen en 1943



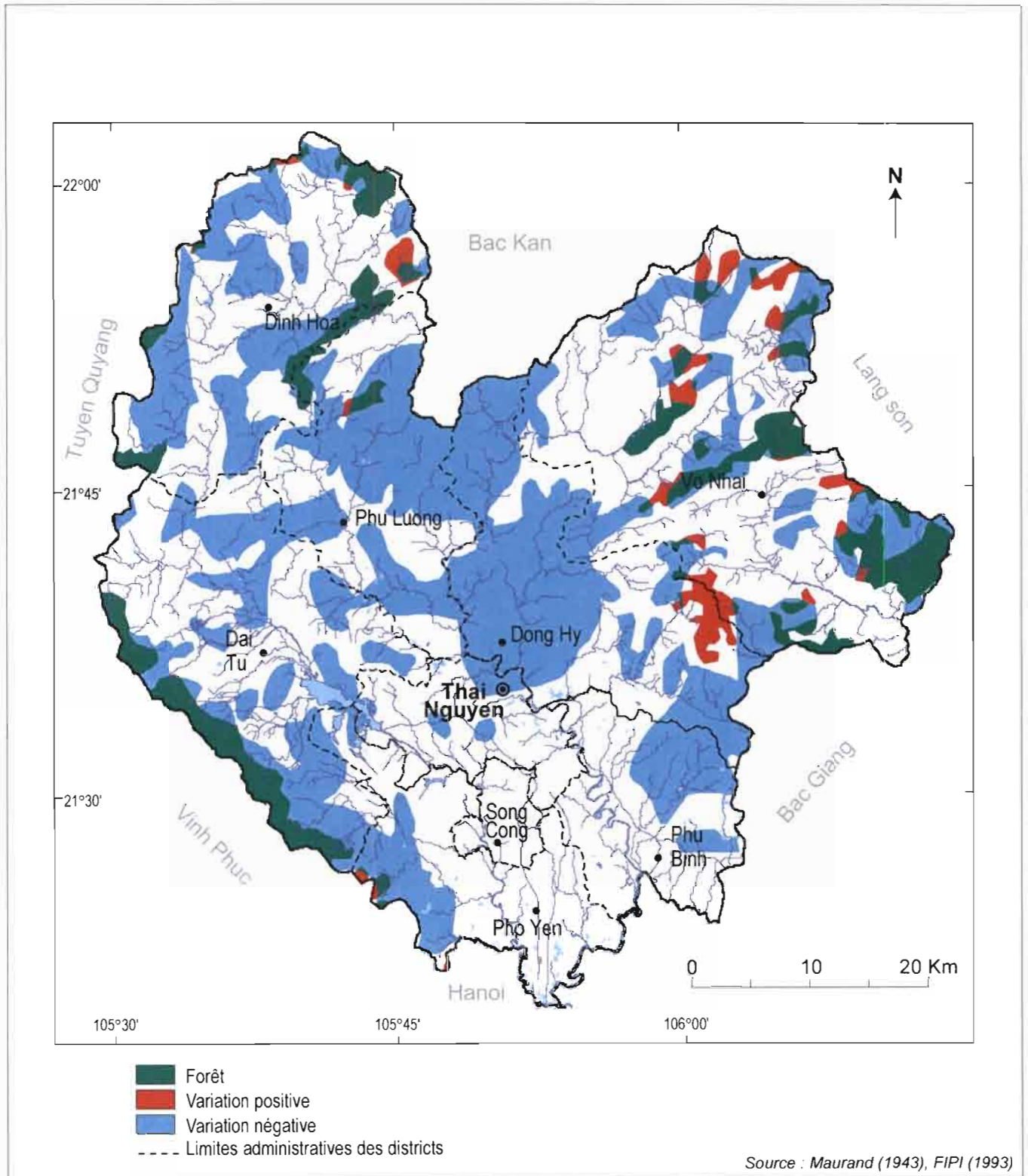
Carte 12 : Localisation des forêts de Thai Nguyen en 1983



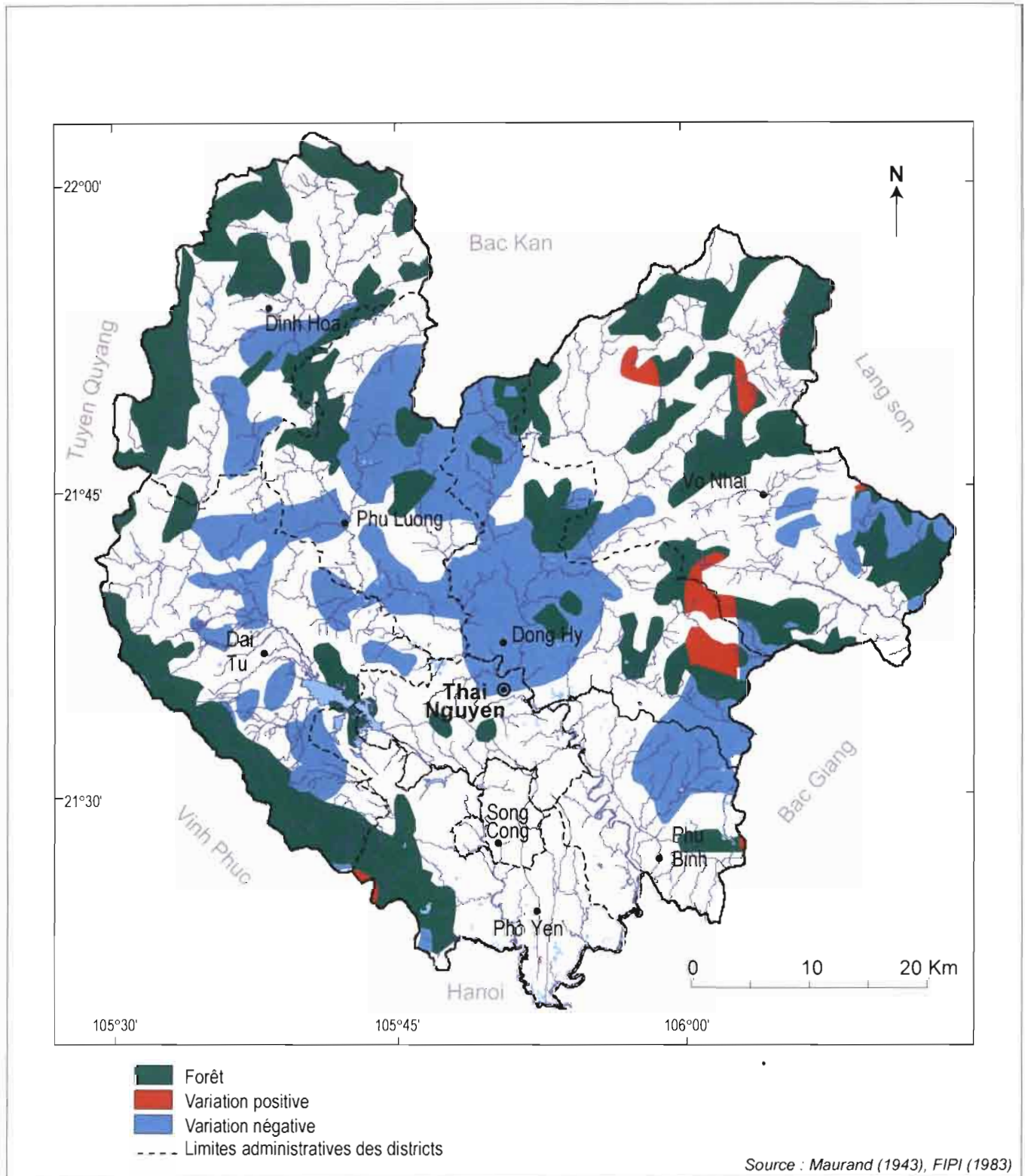
Carte 13 : Localisation des forêts de Thai Nguyen en 1993



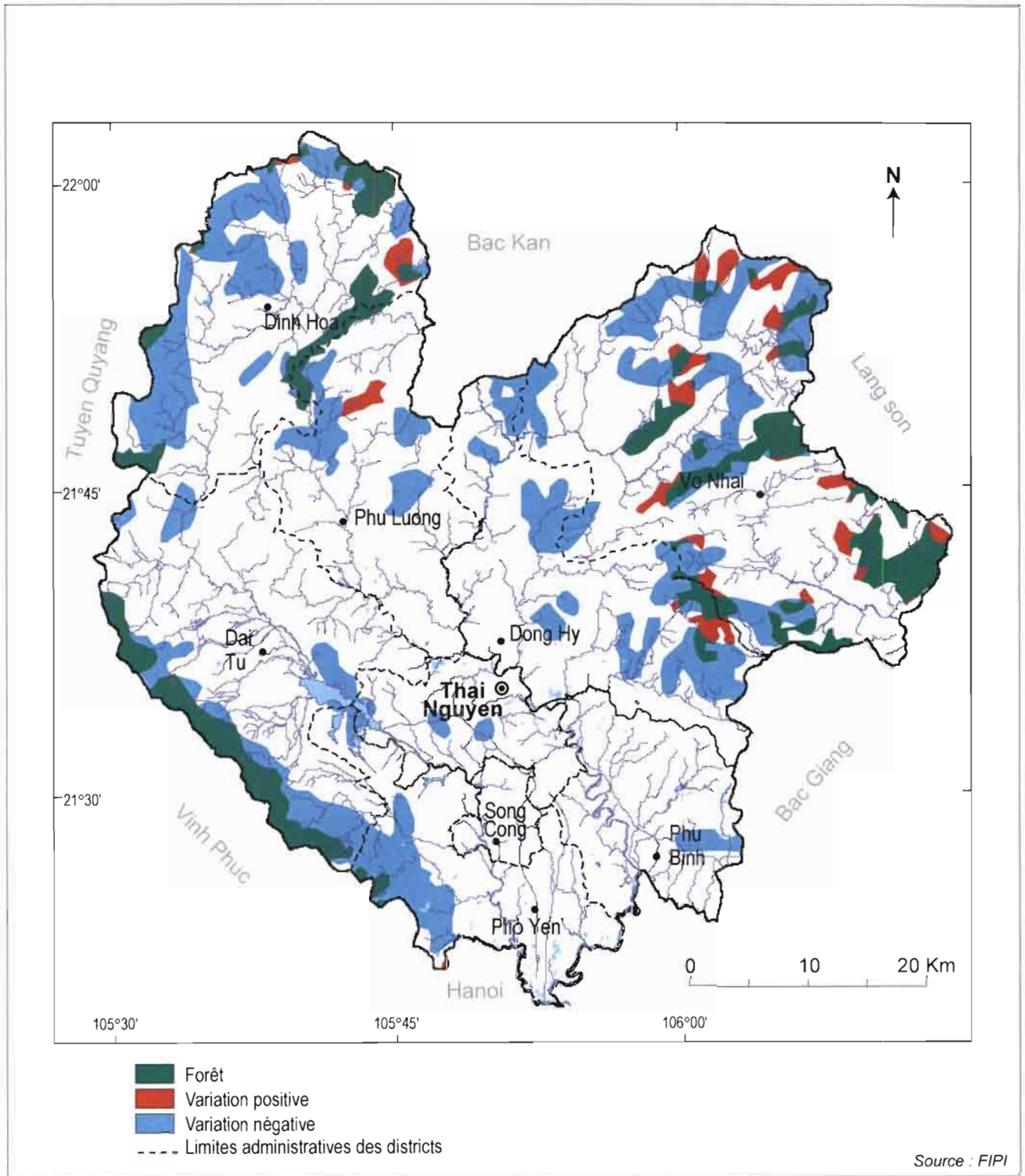
Carte 14 : Variations du couvert forestier de Thai Nguyen, 1943-1993



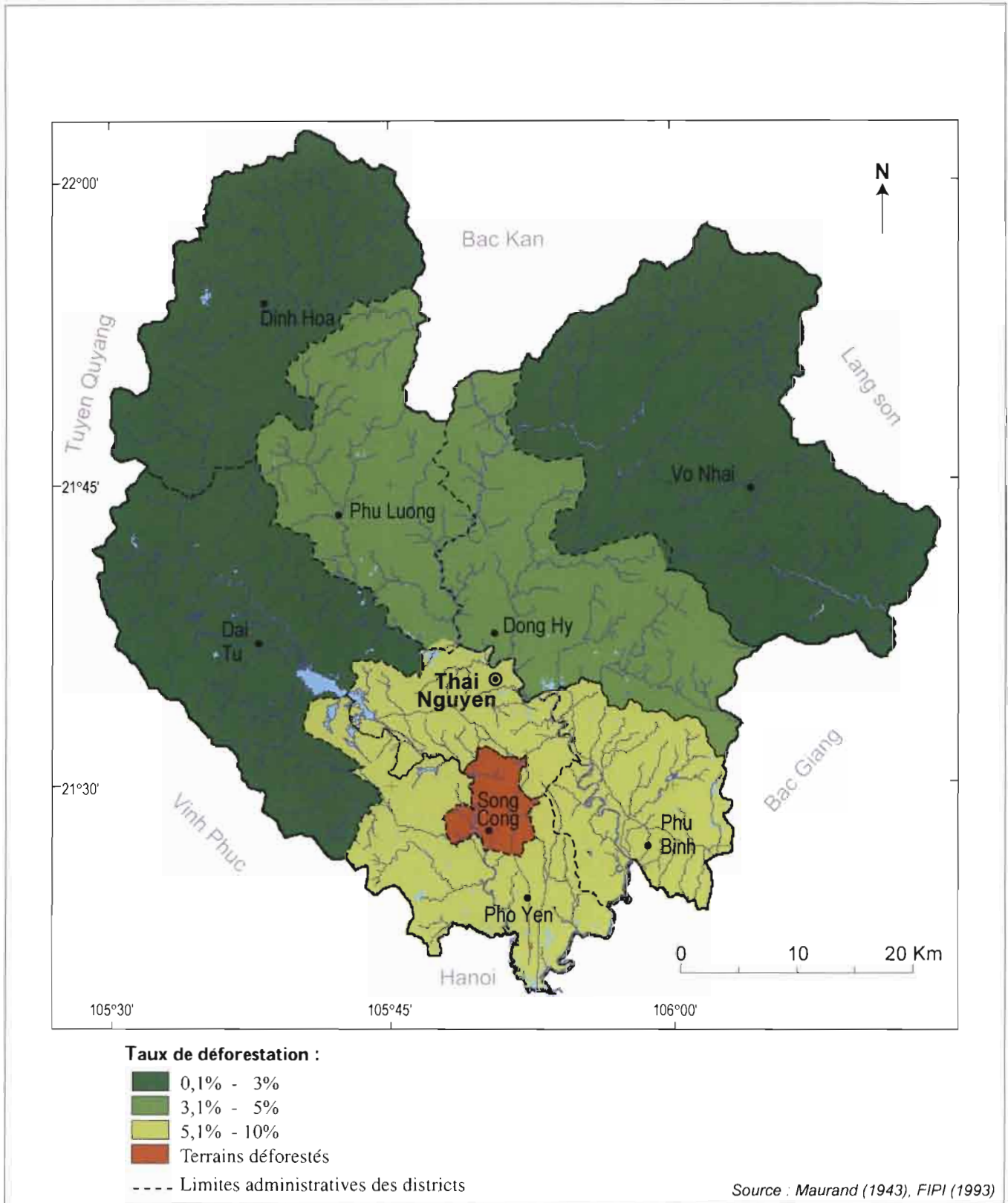
Carte 15 : Variations du couvert forestier de Thai Nguyen, 1943-1983



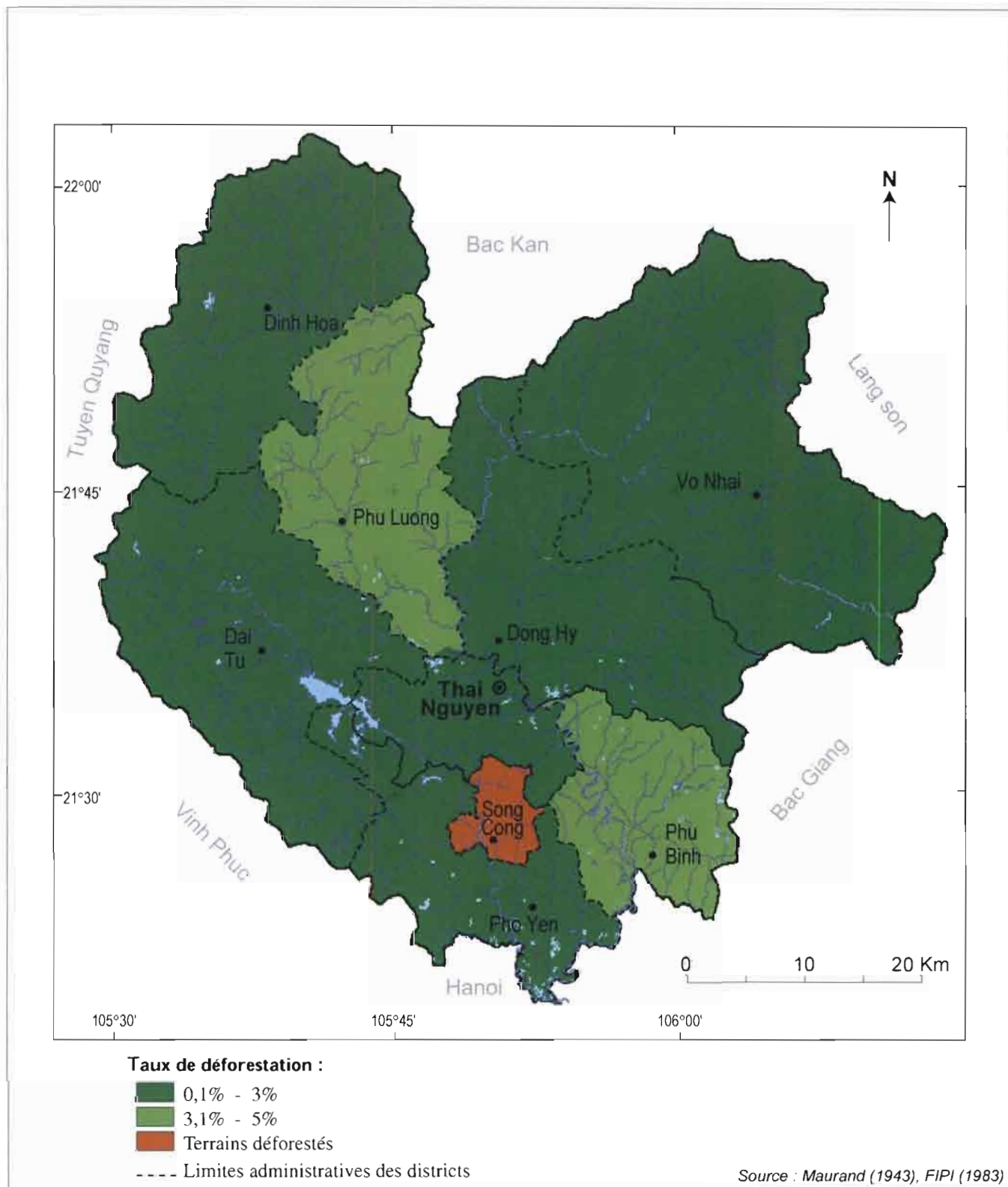
Carte 16 : Variations du couvert forestier de Thai Nguyen, 1983-1993



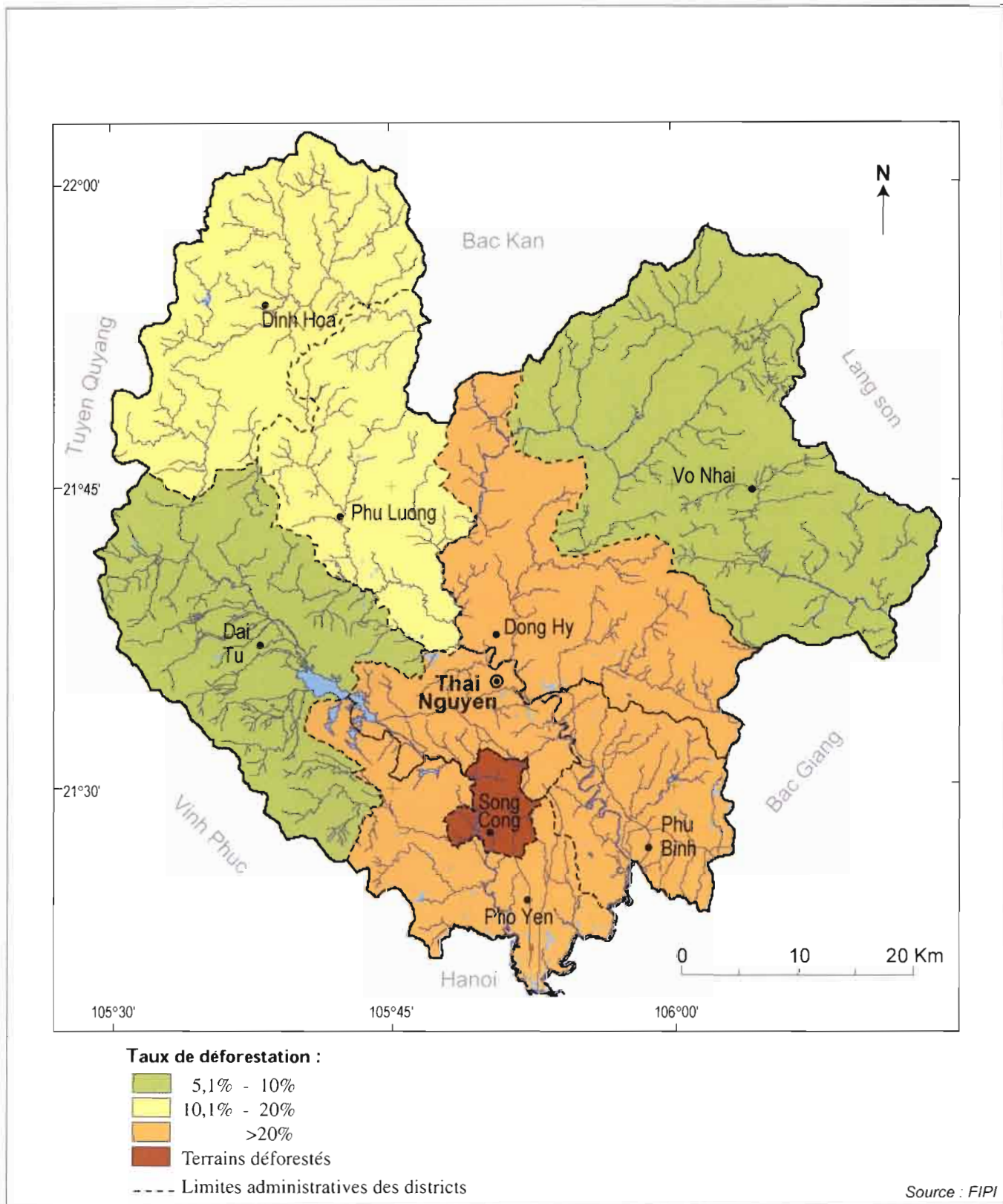
Carte 17 : Taux annuel de déforestation entre 1943 et 1993, par district de Thai Nguyen



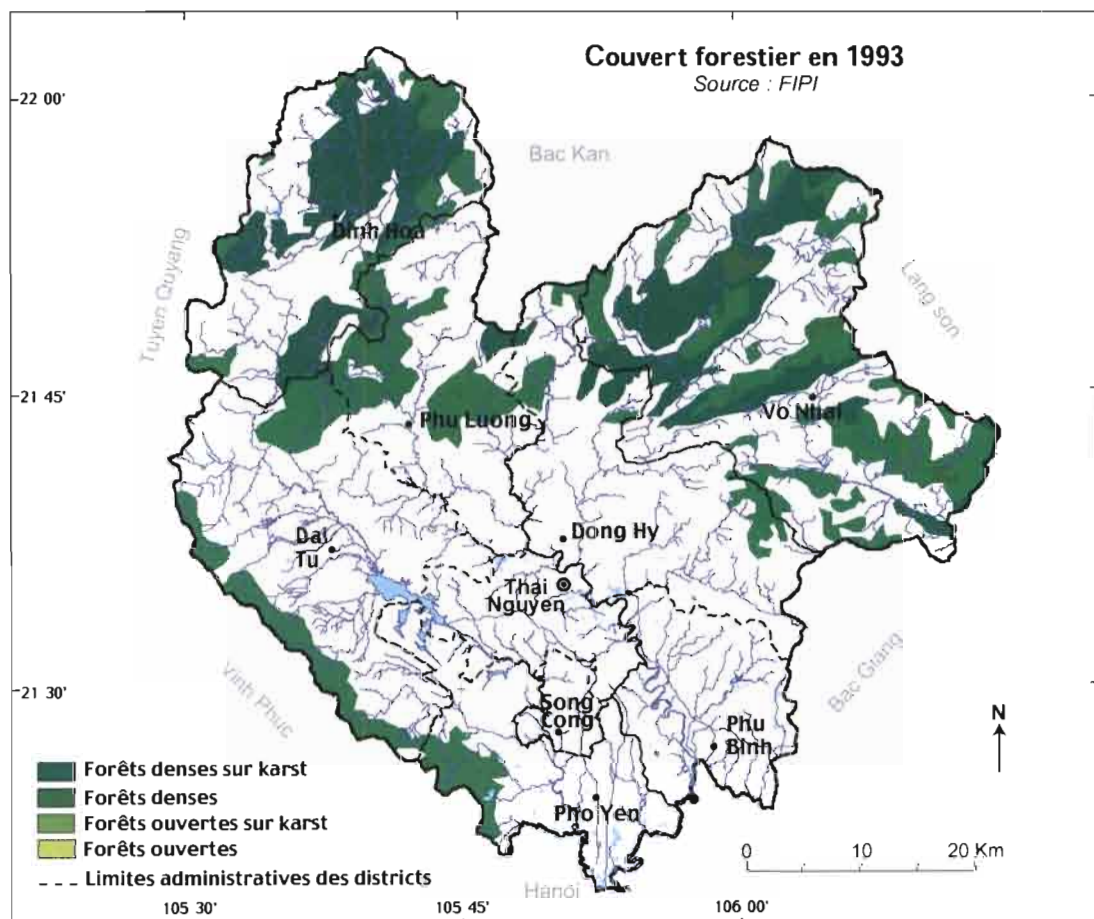
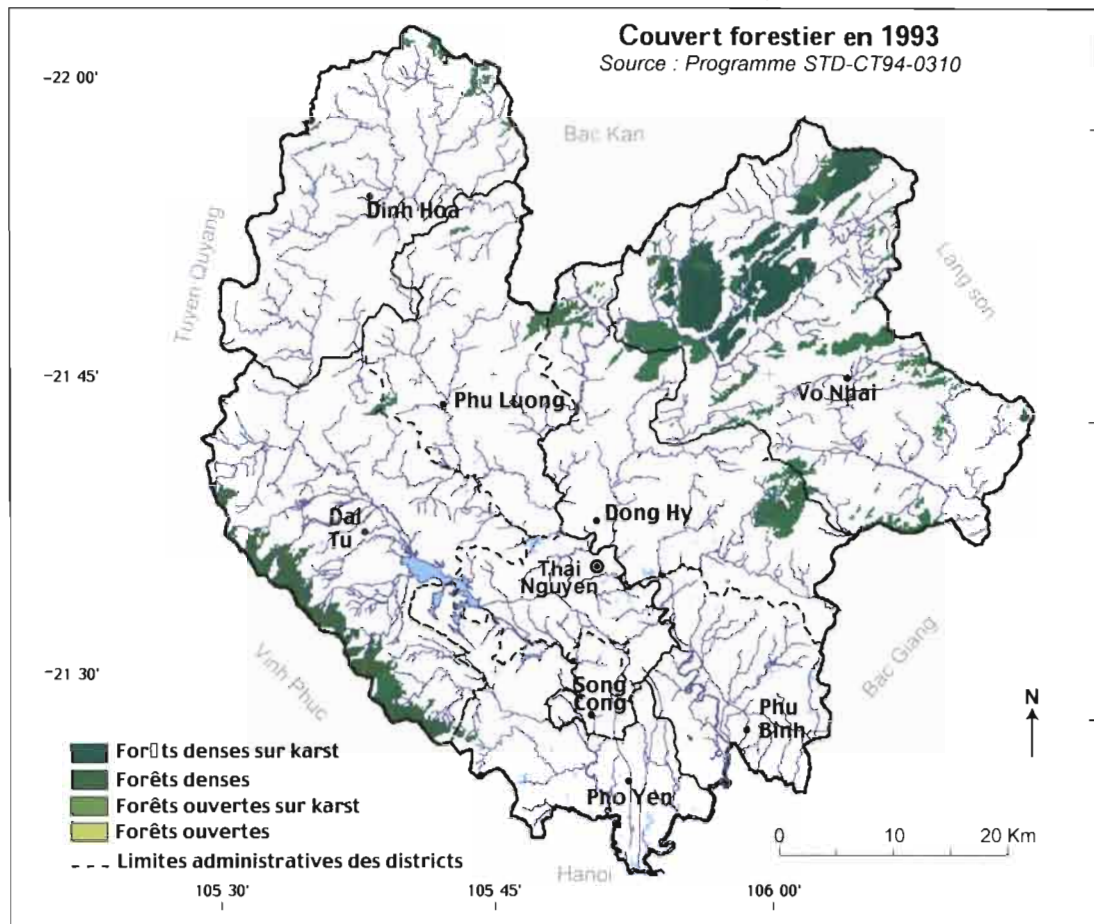
Carte 18 : Taux annuel de déforestation entre 1943 et 1983, par district de Thai Nguyen



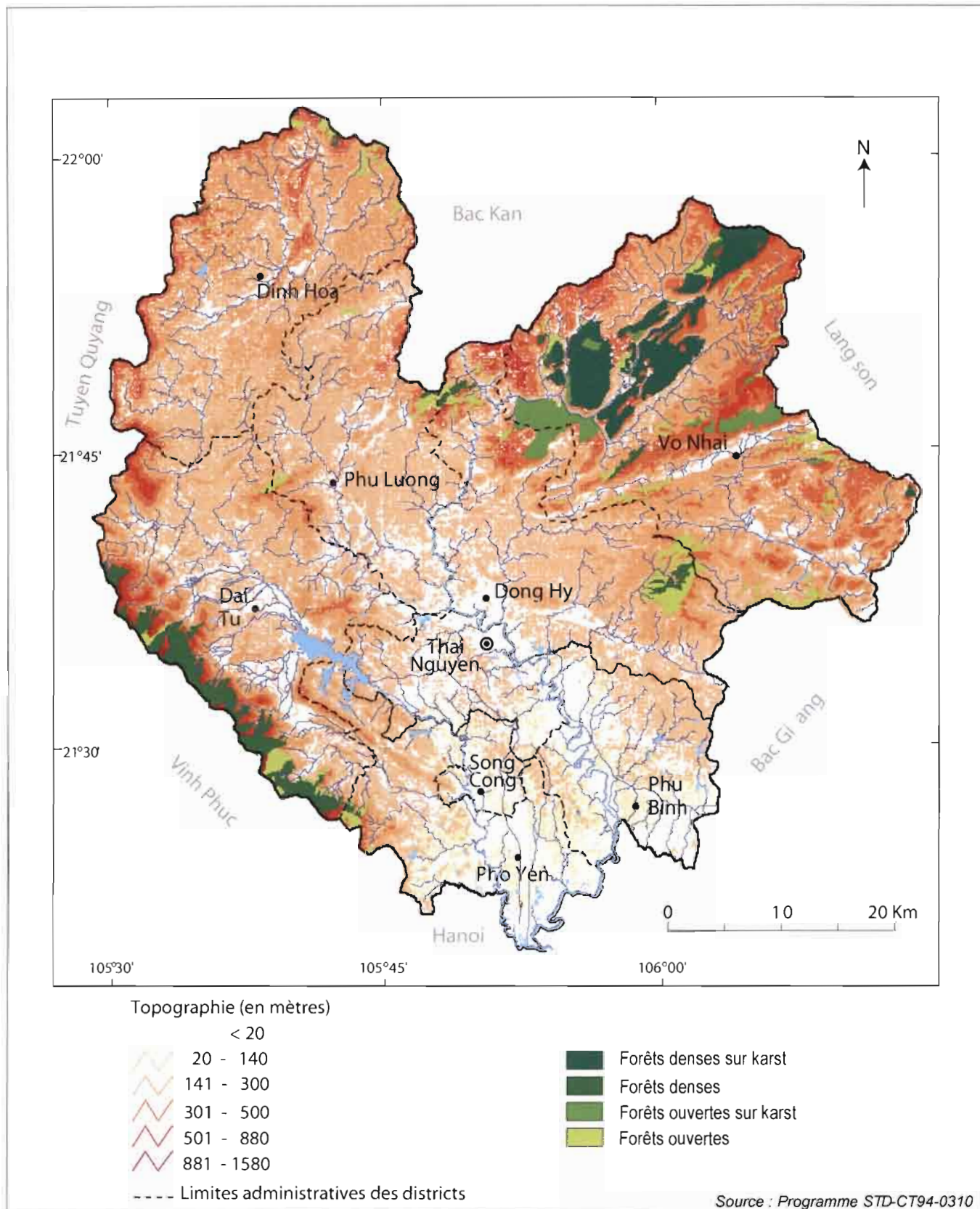
Carte 19 : Taux annuel de déforestation entre 1983 et 1993, par district de Thai Nguyen



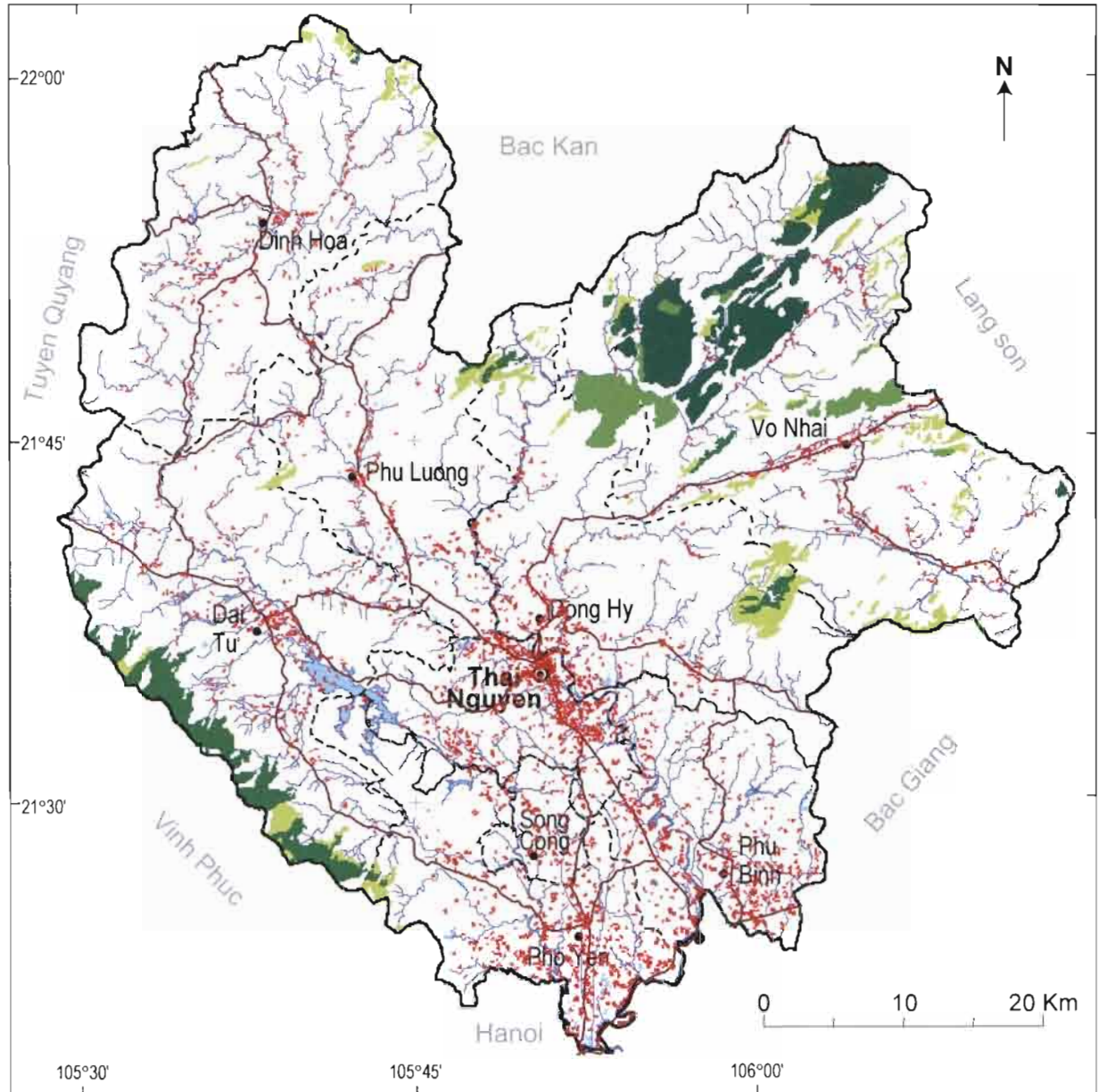
Carte 20 : comparaison des forêts de Thai Nguyen, identifiées par le FIPI et par le Programme STD










Carte 21 - Relation entre la topographie et la localisation des forêts de Thai Nguyen



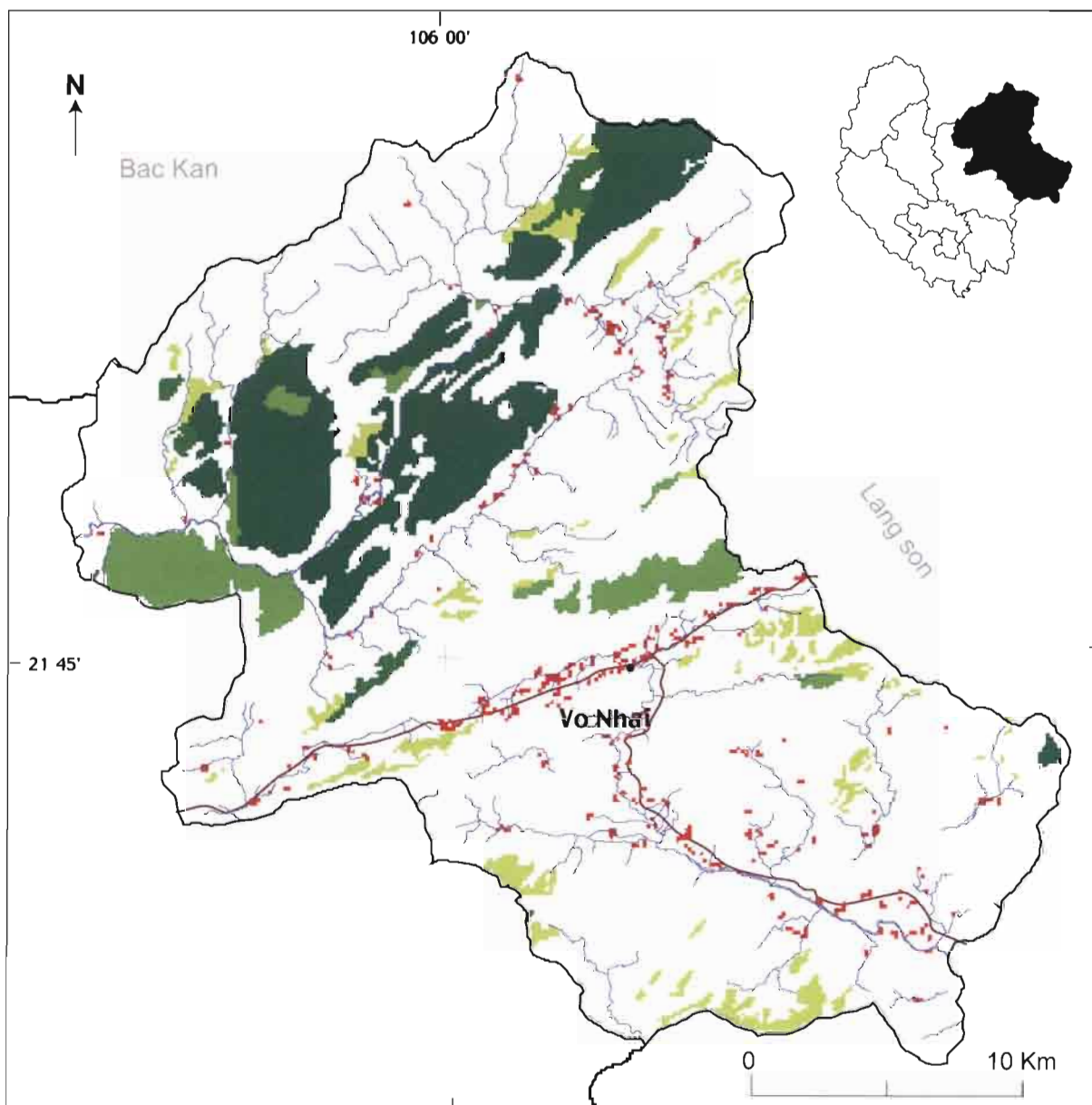
Carte 22 - Influence de la distribution de l'habitat, du réseau routier et du réseau hydrographique sur la déforestation de Thai Nguyen



- | | |
|--|--|
|  Forêts denses sur karst |  Réseau routier |
|  Forêts denses sur autre substrat |  Limites administratives des districts |
|  Forêts ouvertes sur karst | |
|  Forêts ouvertes sur autre substrat | |
|  Zones urbaines | |

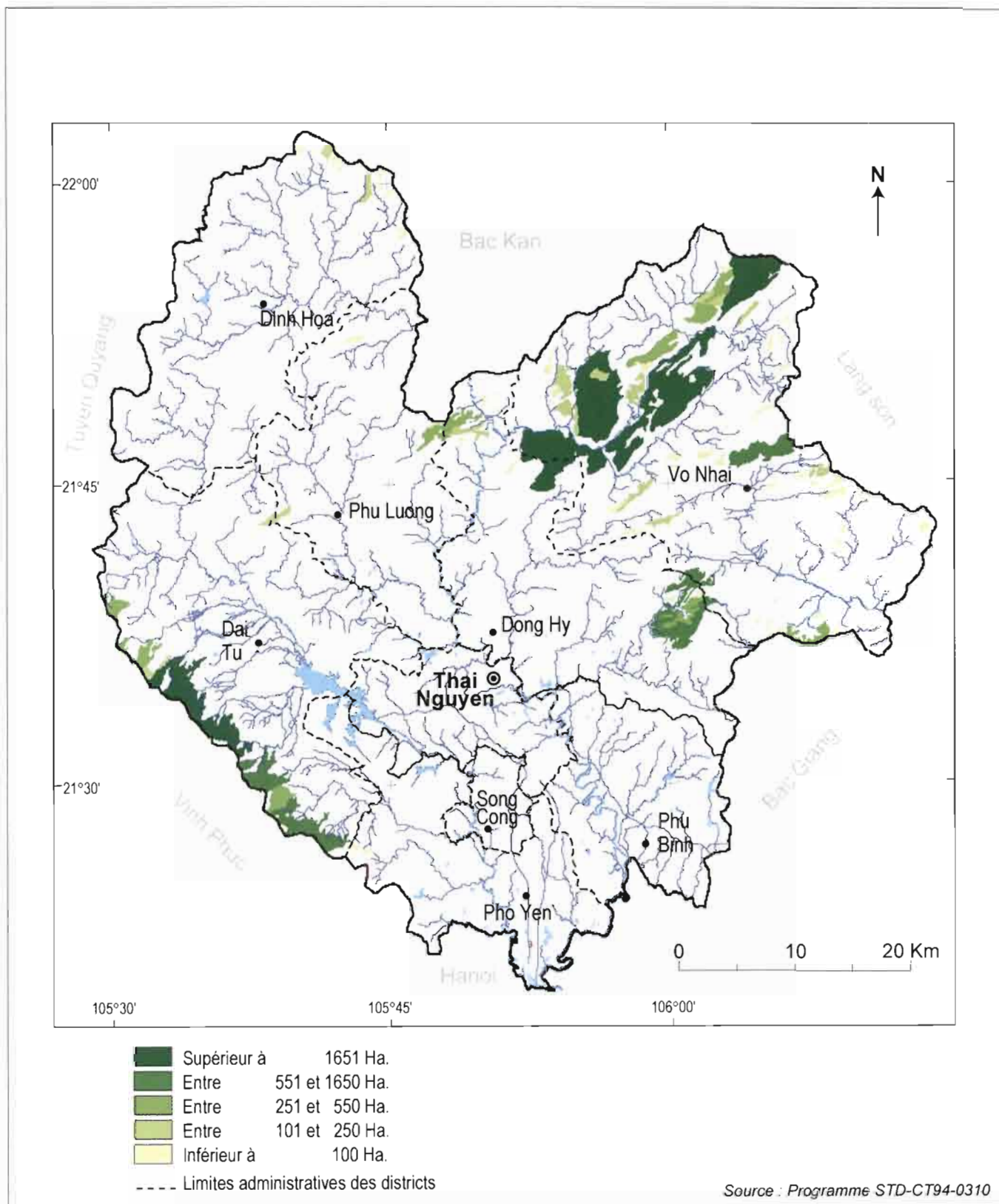
Source : Programme STD-CT94-0310

Carte 23 : Influence de la distribution de l'habitat, du réseau routier et du réseau hydrographique sur la déforestation à Vo Nhai, province de Thai Nguyen

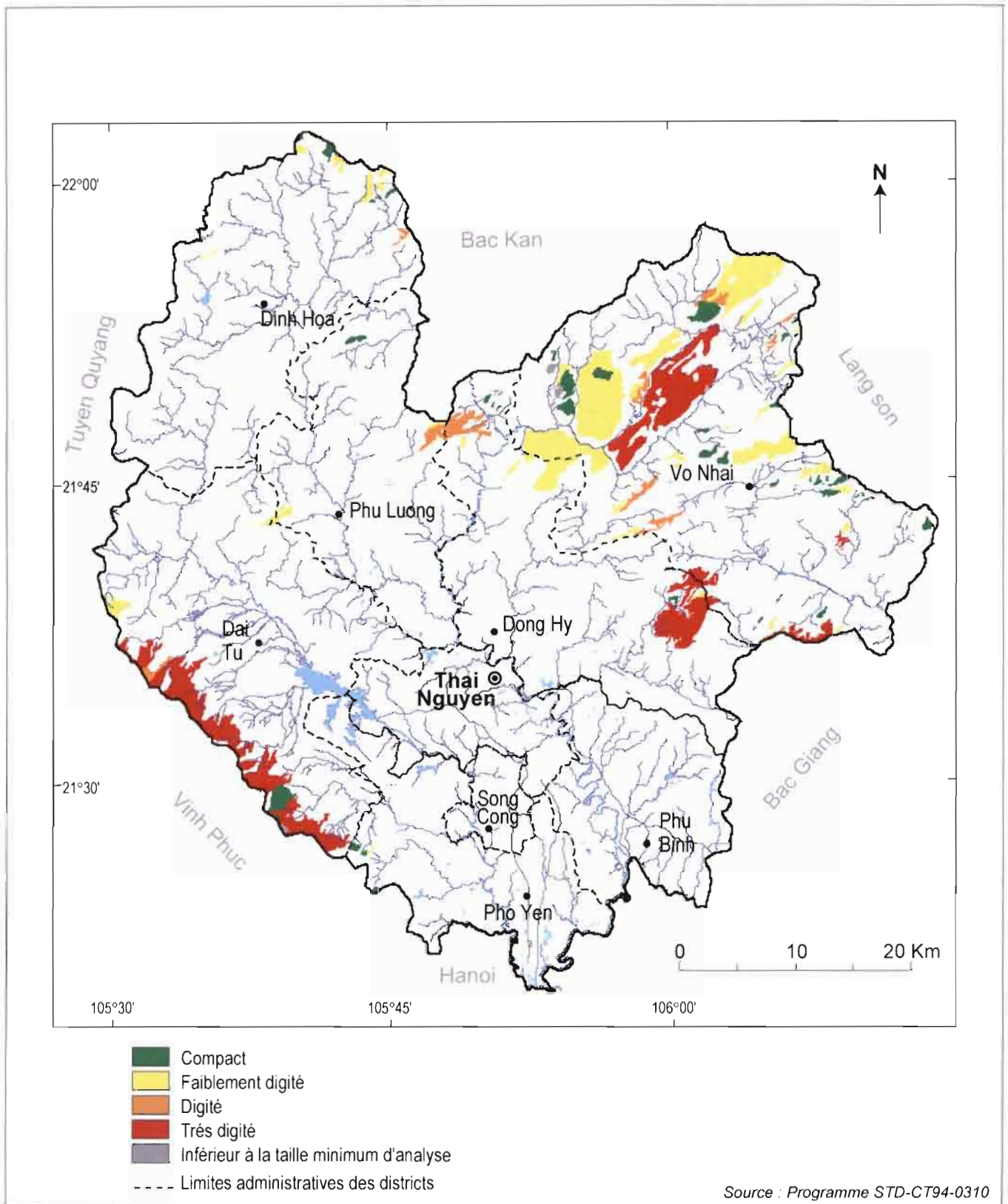


Source : Programme STD-CT94-0310

Carte 24 : Indicateur de dimension des zones forestières de Thai Nguyen

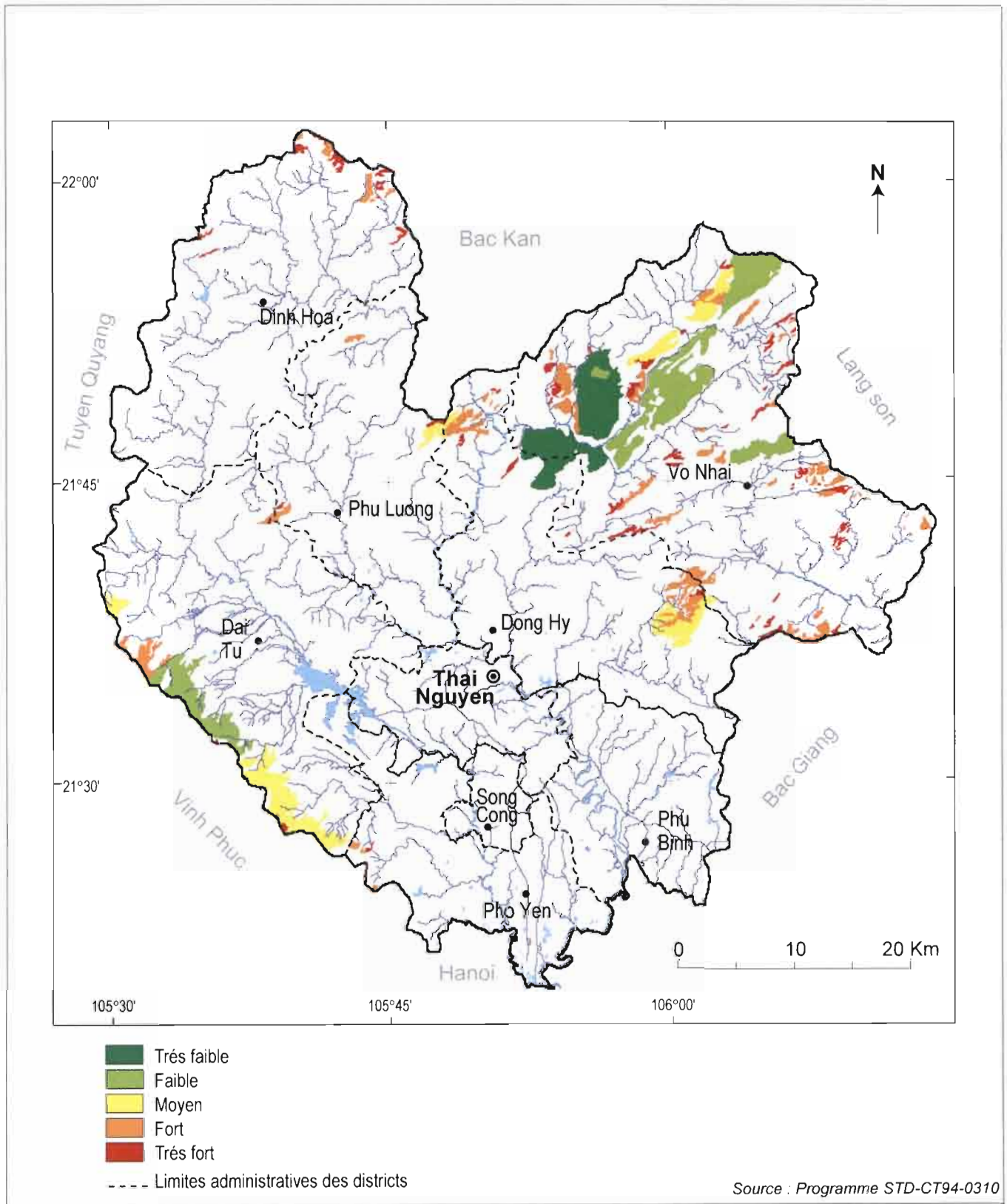


Carte 25 : Indicateur de compacité des forêts de Thai Nguyen

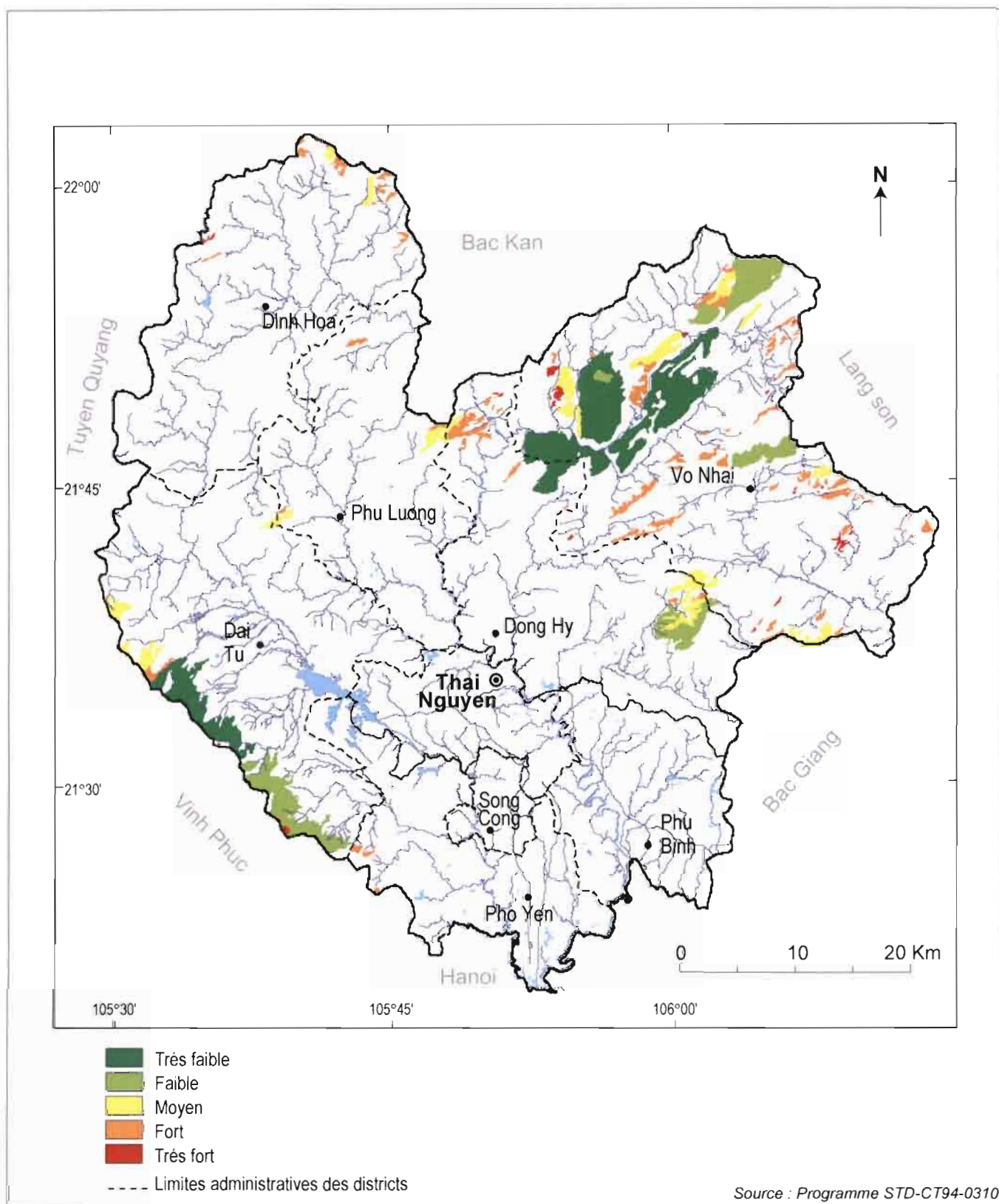


Source : Programme STD-CT94-0310

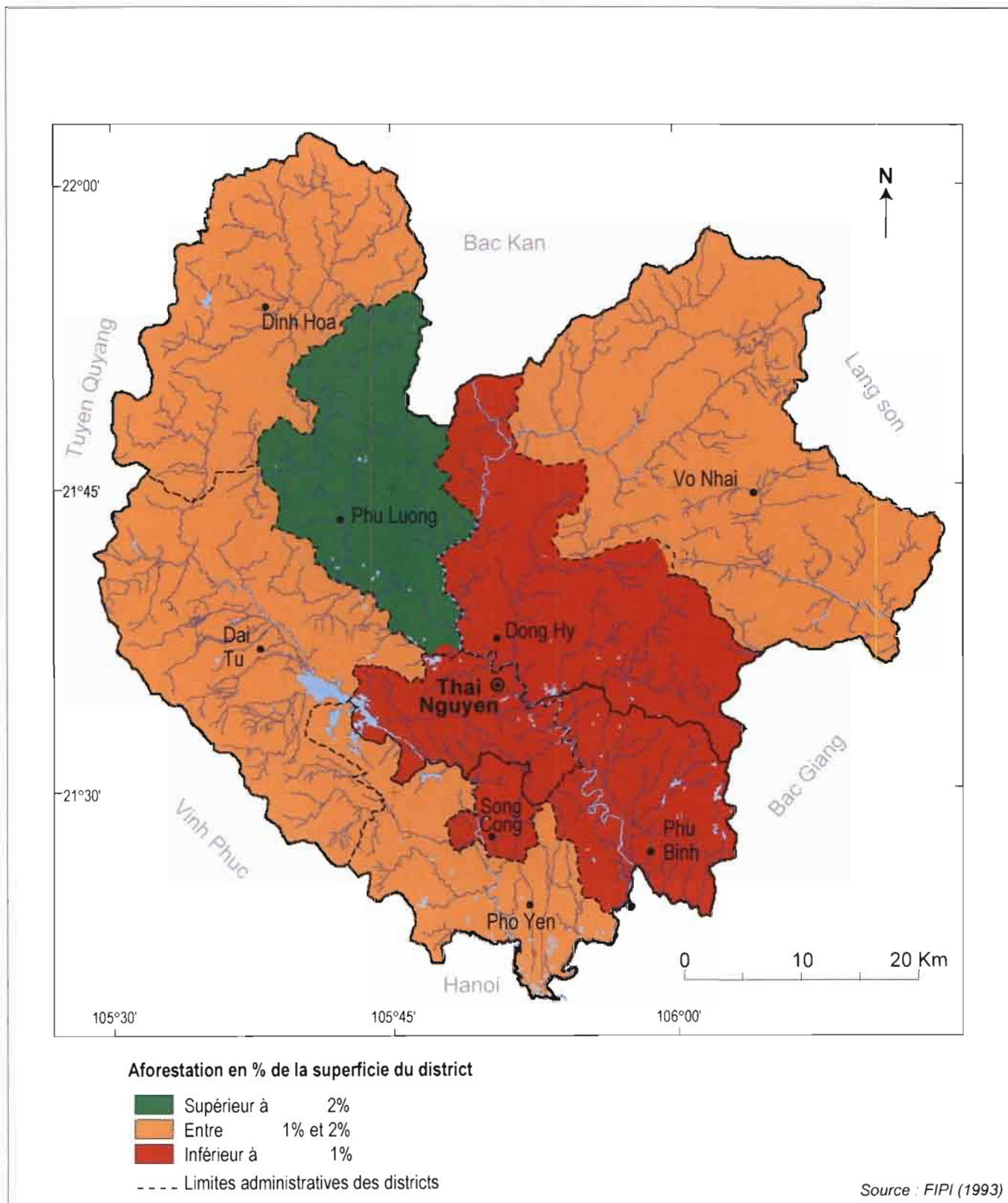
Carte 26 : Indice d'état de fragilité des forêts de Thai Nguyen (Taille / compacité : 3)



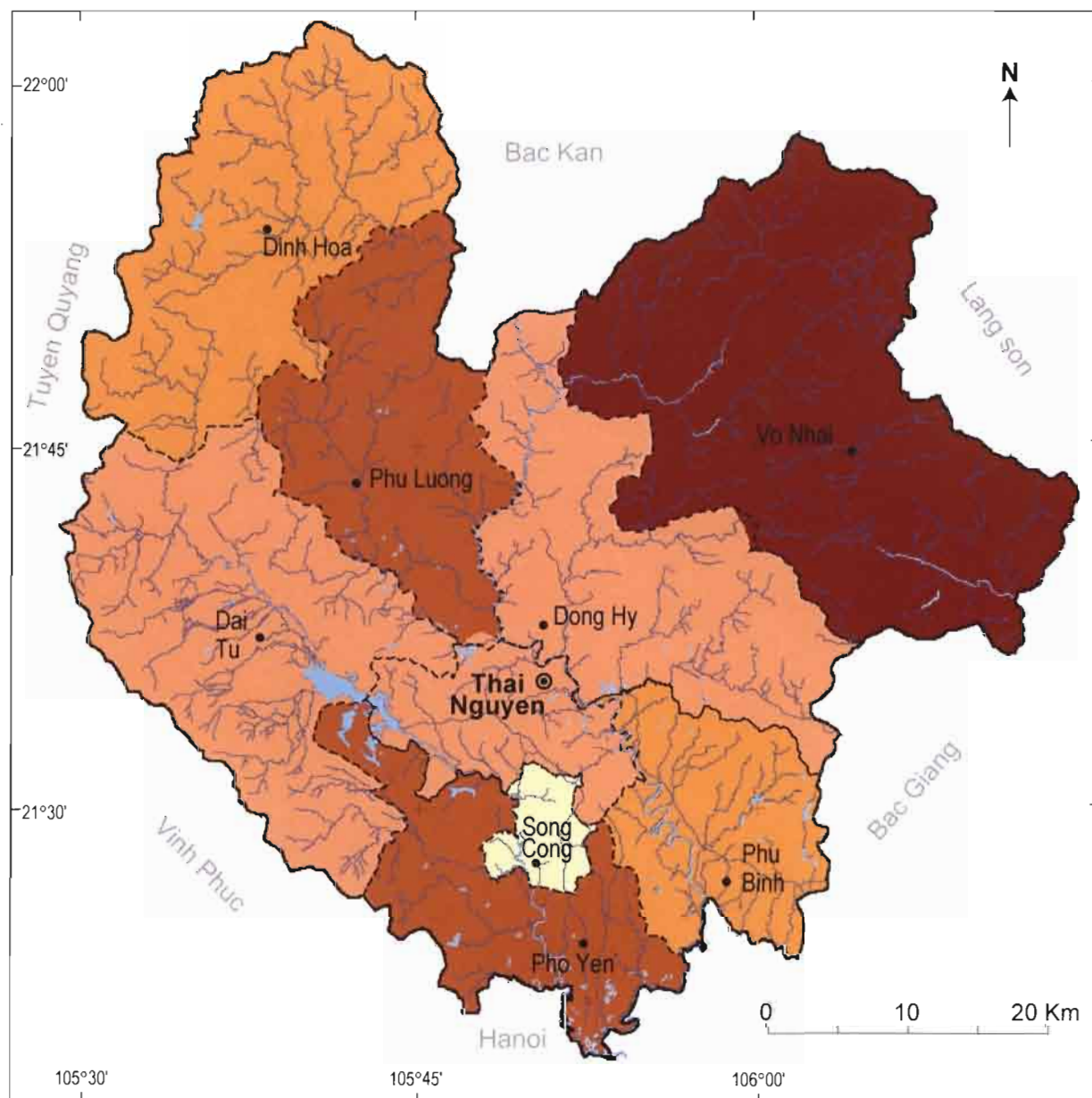
Carte 27 : Indice d'état de fragilité des forêts de Thai Nguyen (Taille / compacité : 4)



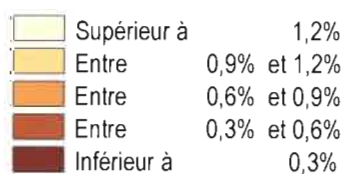
Carte 28 : Aforestation par district de Thai Nguyen (situation en 1993)



Carte 29 : Reboisement, par district de Thai Nguyen



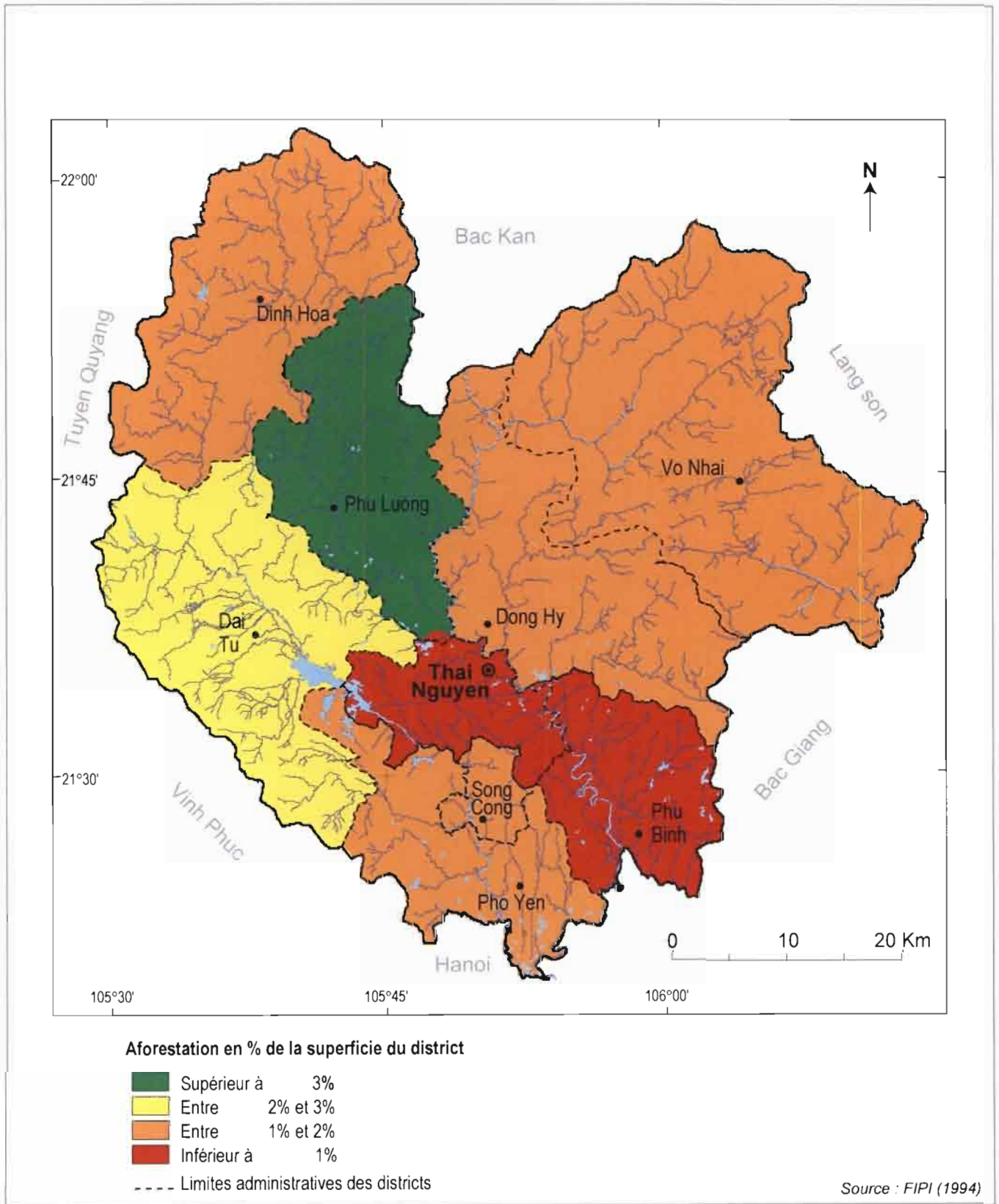
% superficie reboisement/superficie totale :



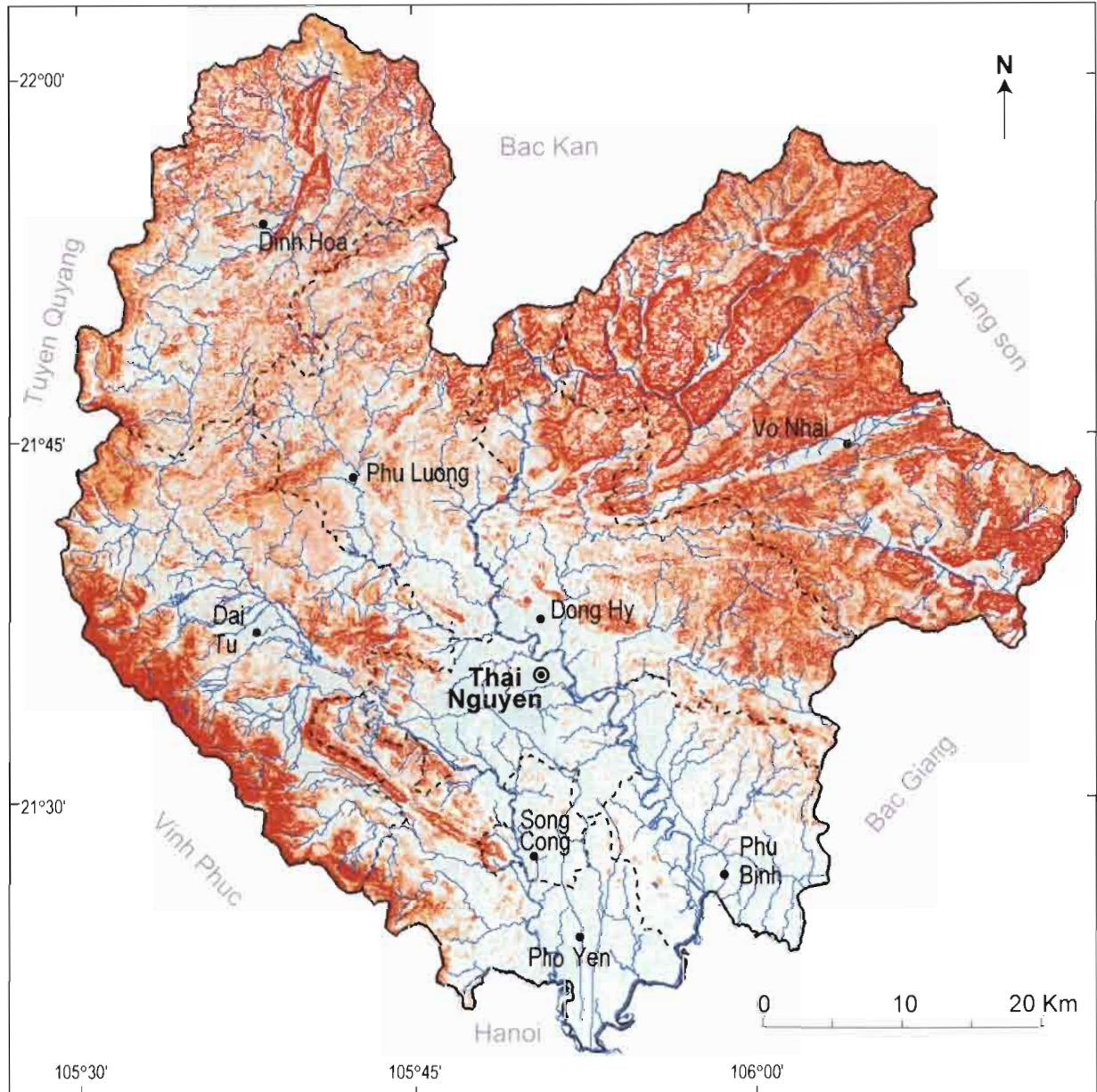
----- Limites administratives des districts

Source : FIPI (1993)

Carte 30 : Indice de reboisement en 1993, par district de Thai Nguyen



Carte 31 : Influence de la pente sur le risque d'érosion du sol de Thai Nguyen



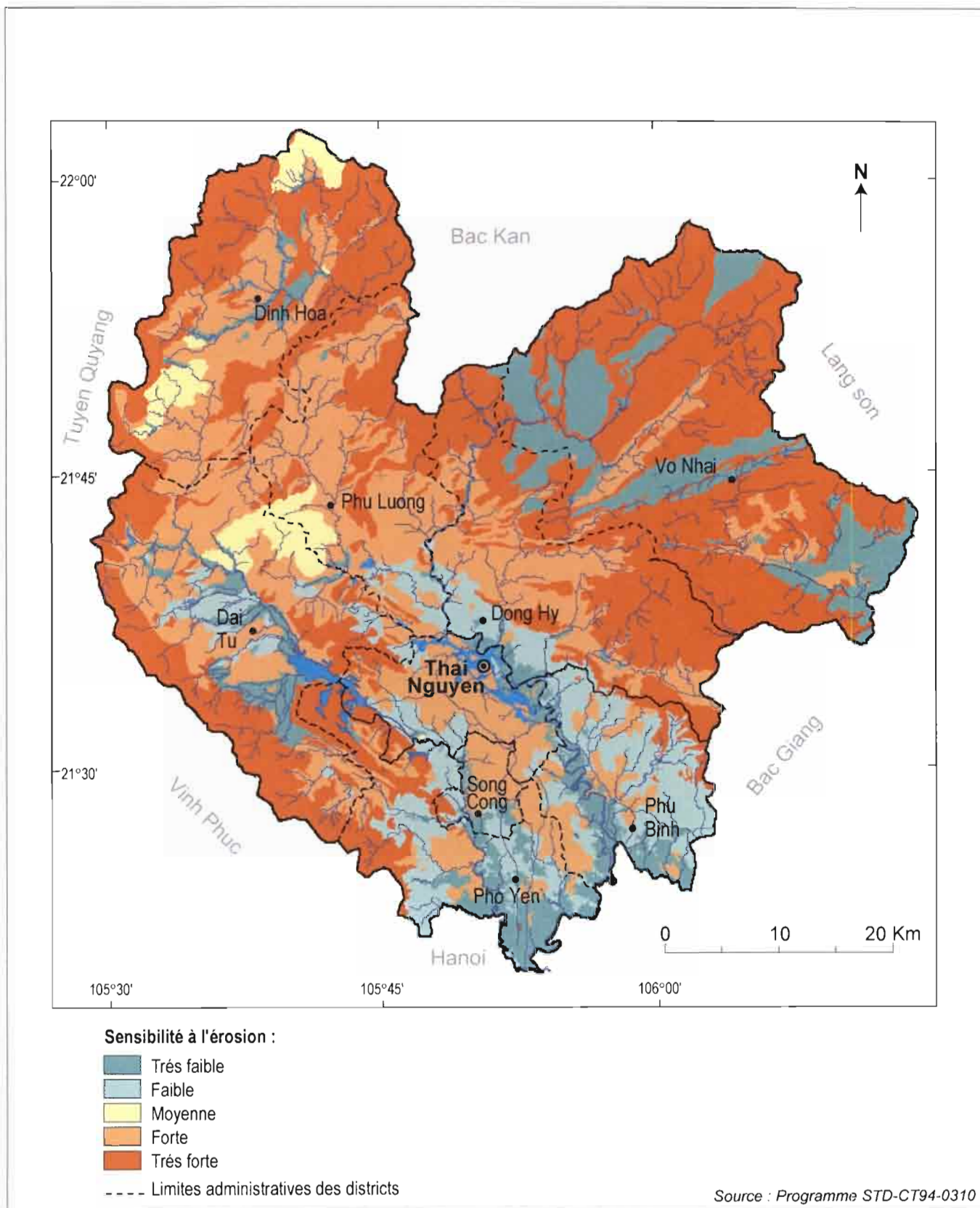
Pente en % et indice de risque

- 1. < 3% : Risque très faible
- 2. < 4-8% : Risque faible
- 3. < 9-15% : Risque moyen
- 4. < 16-40% : Risque élevé
- 5. < 40% : Risque très élevé

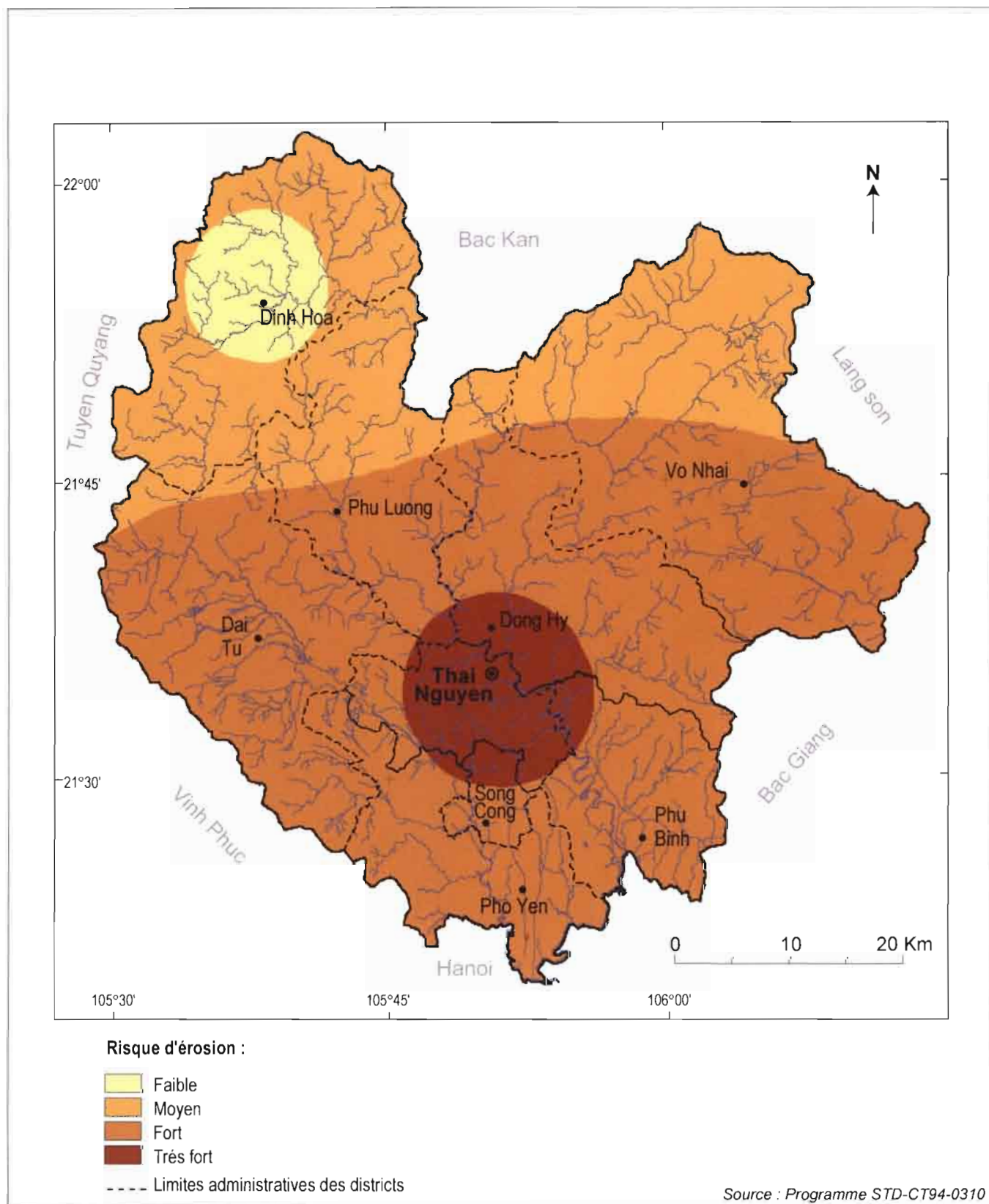
--- Limites administratives des districts

Source : Programme STD-CT94-0310

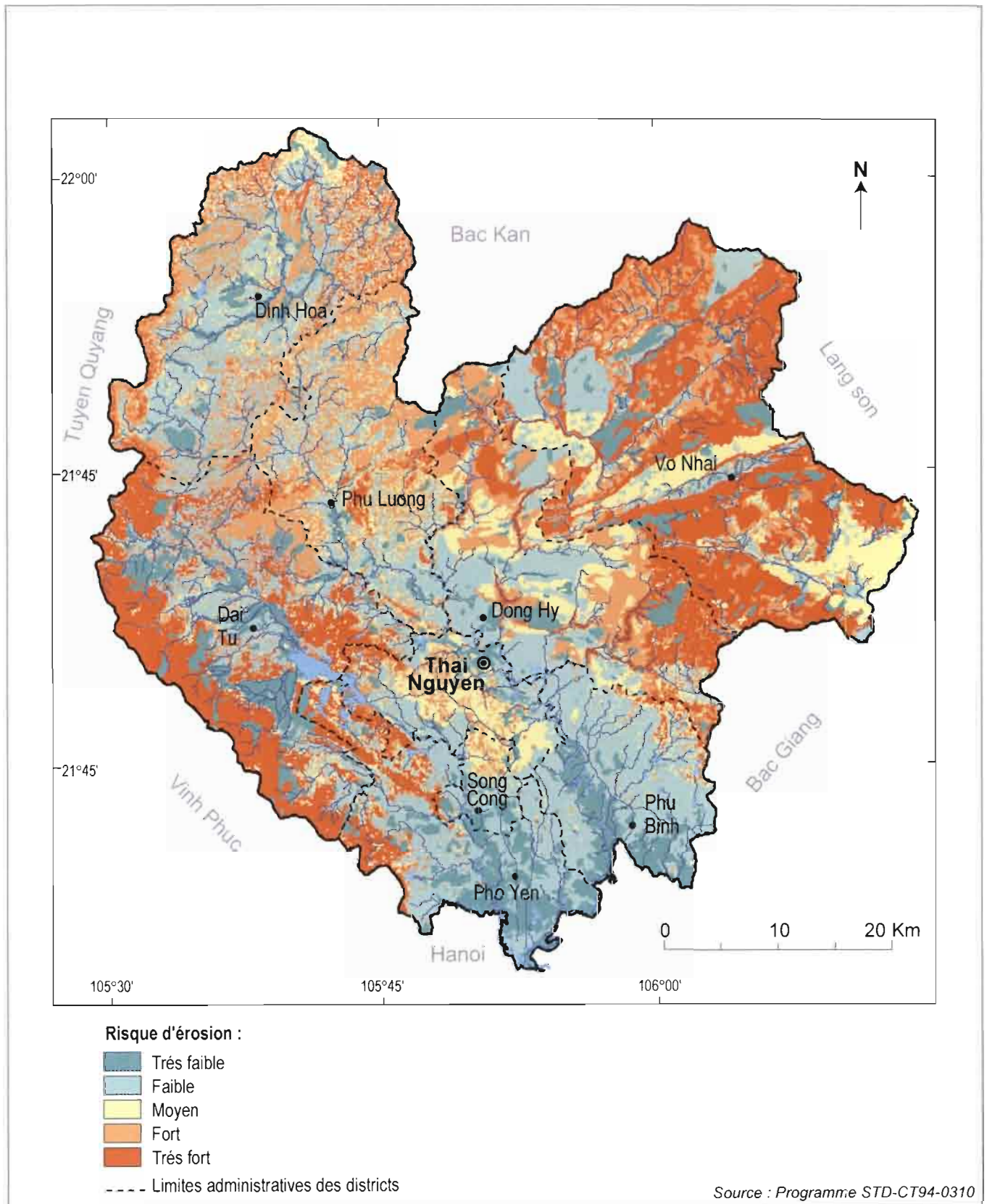
Carte 32 : Influence de la morpho-pédologie sur la sensibilité du sol à l'érosion de Thai Nguyen



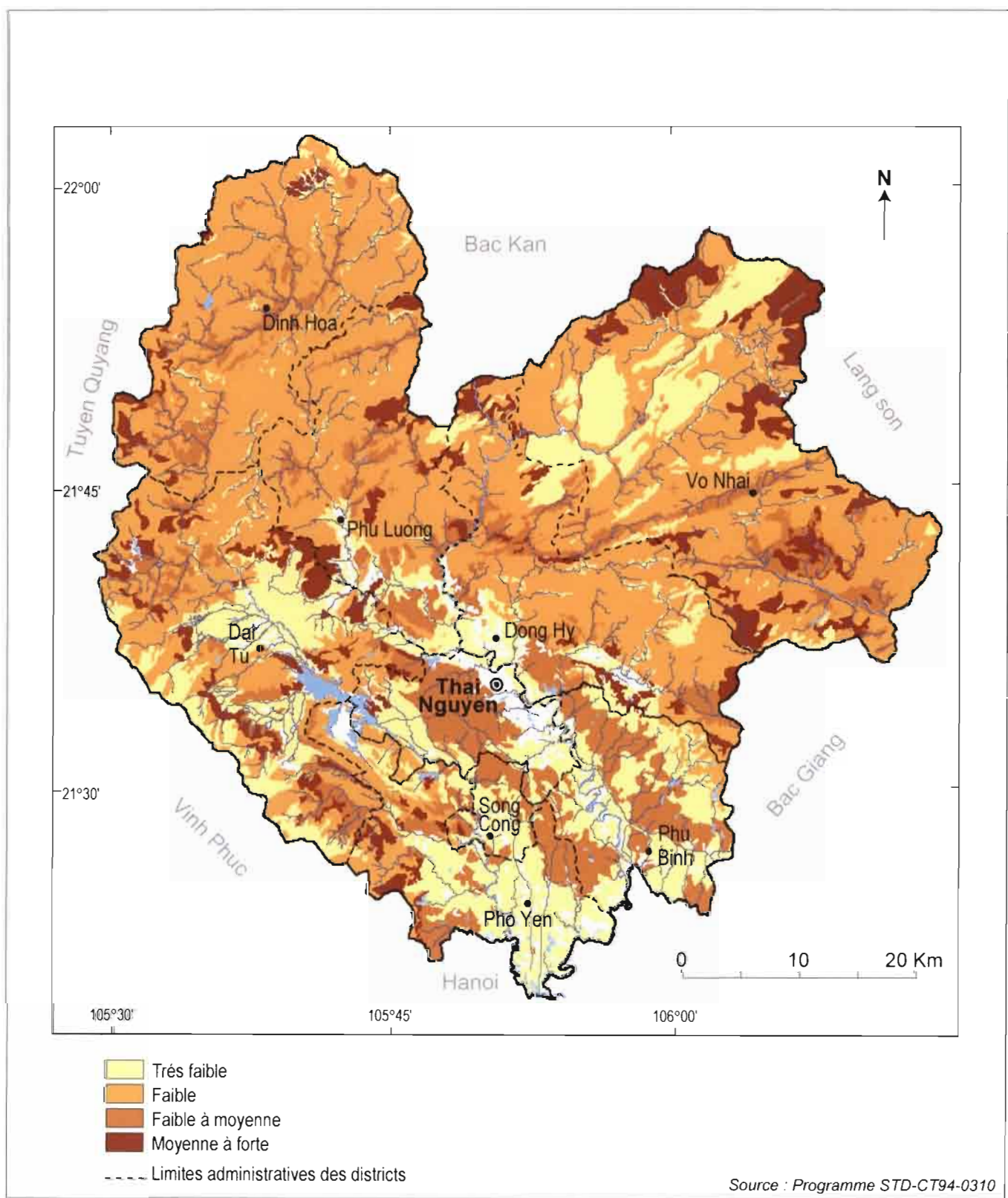
Carte 33 : Influence de la pluviométrie sur le risque d'érosion du sol de Thai Nguyen



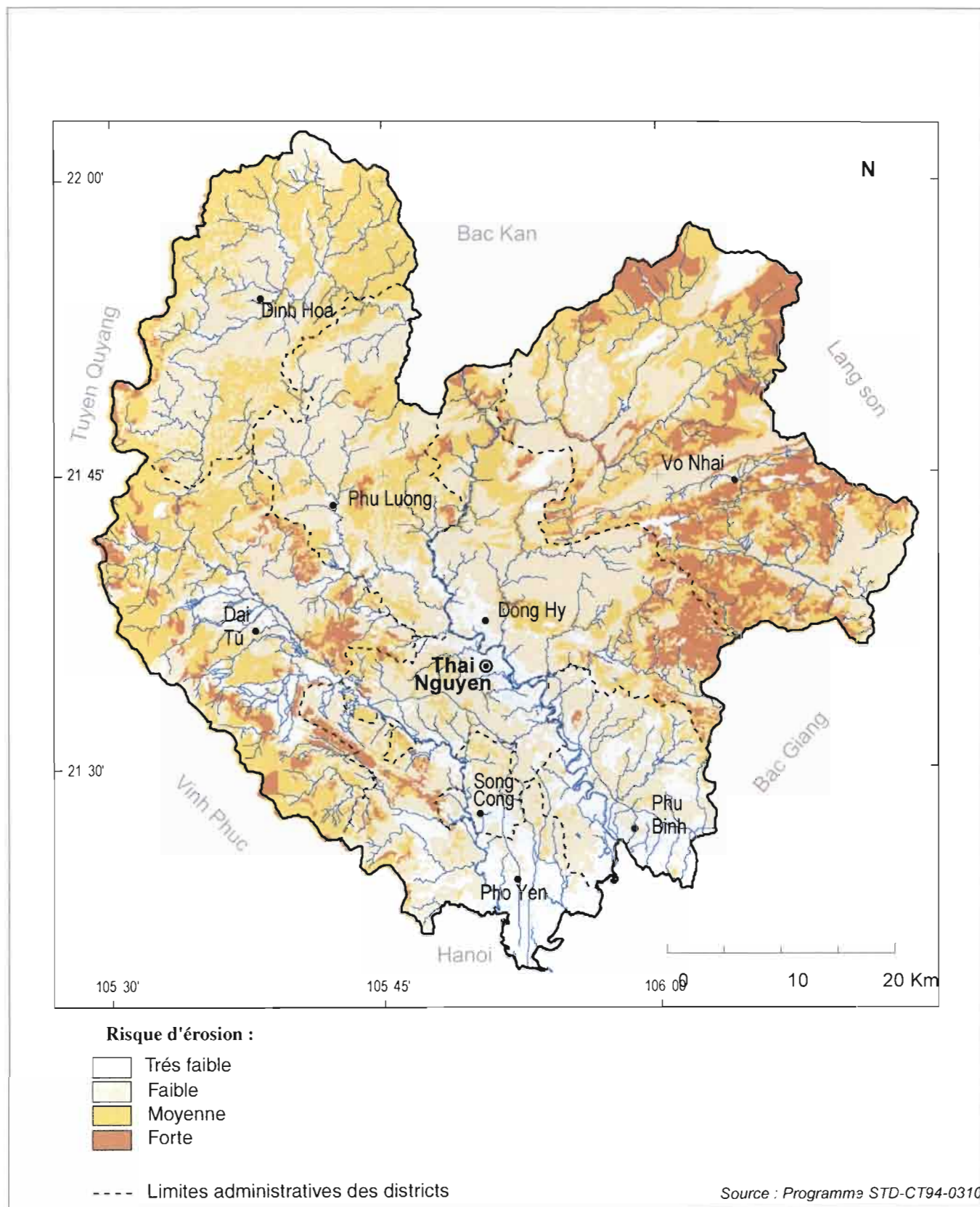
Carte 34 : Vulnérabilité inhérente des sols à l'érosion



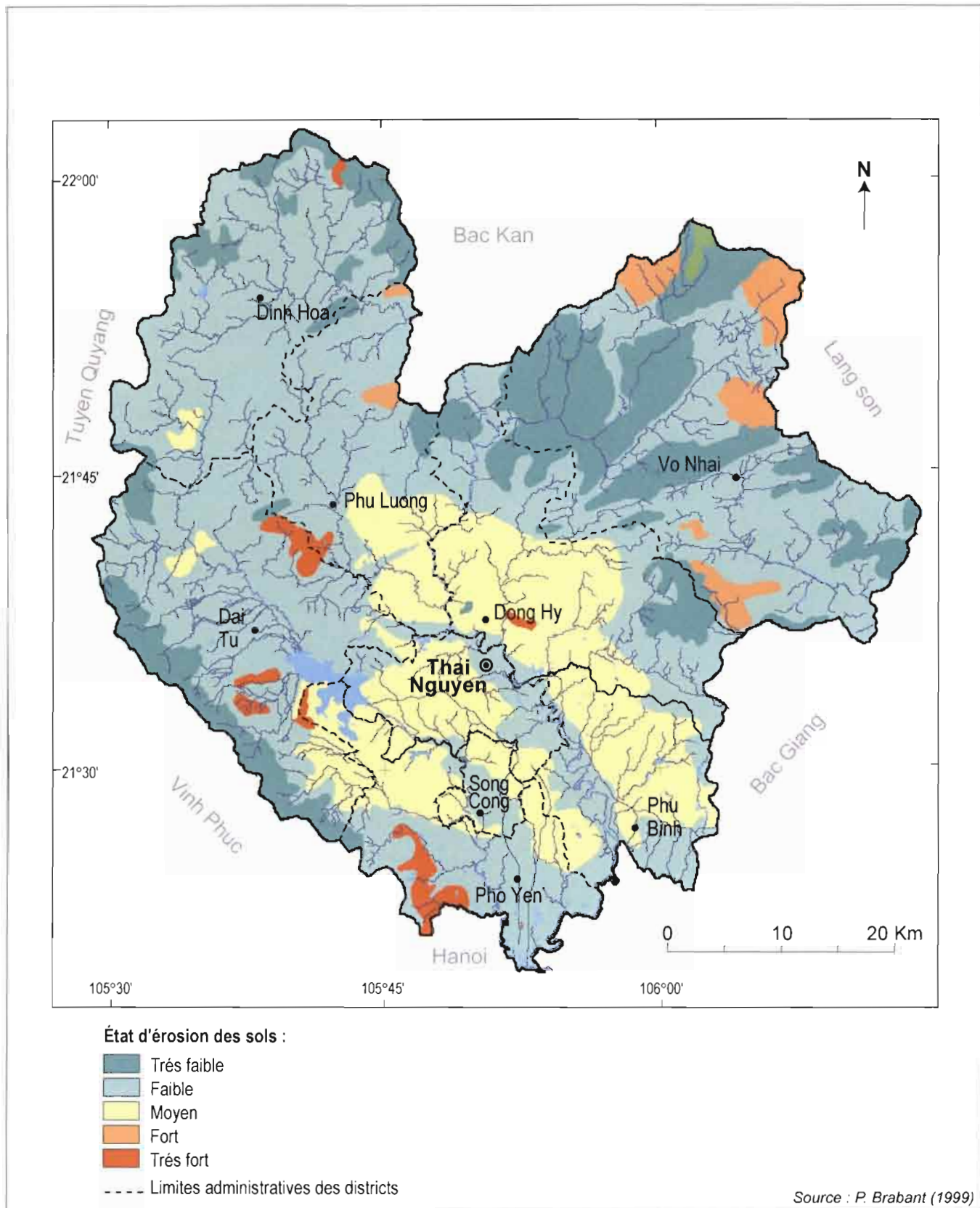
Carte 35 : Influence de l'occupation des sols sur l'érosion Thai Nguyen



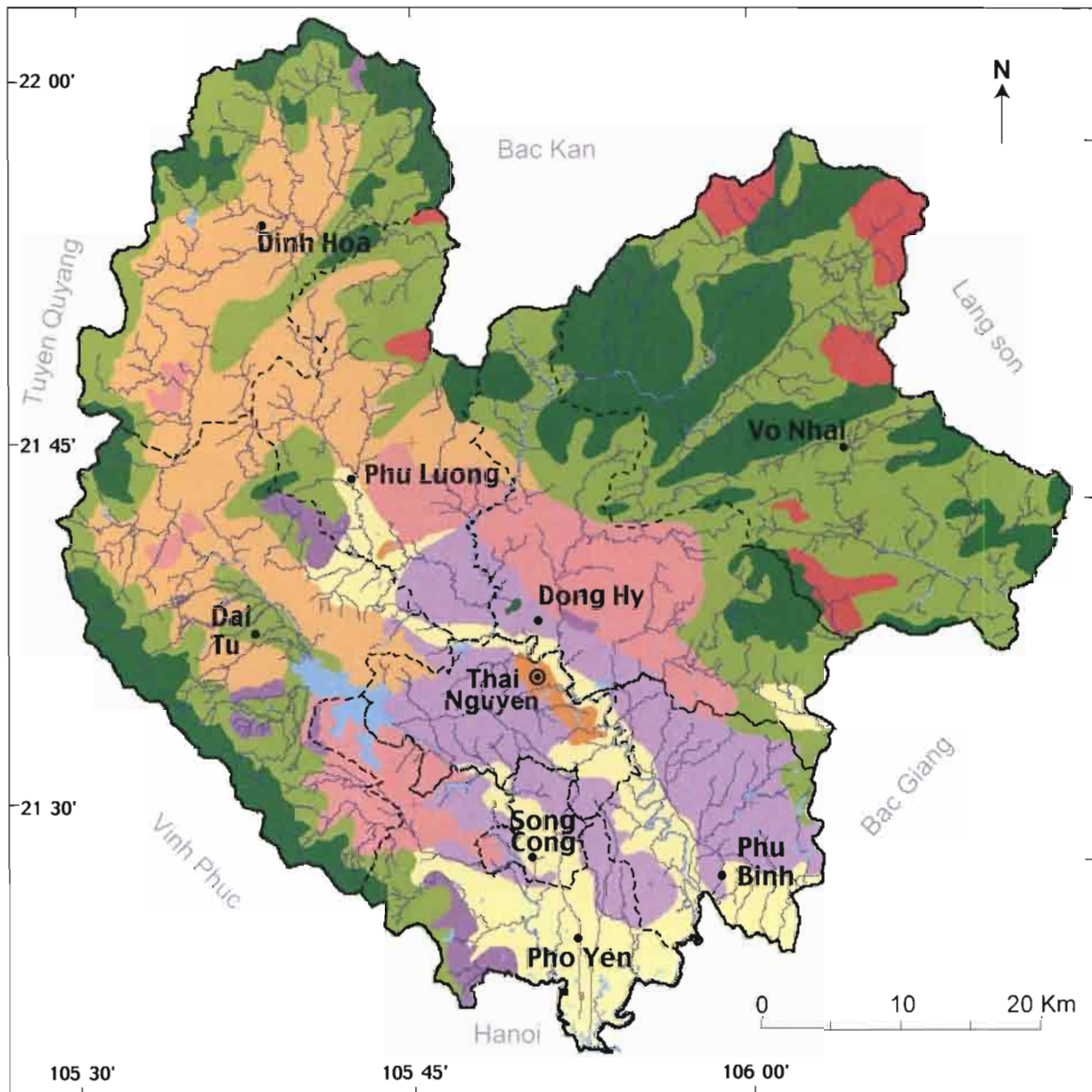
Carte 36 : Indice de risque d'érosion des sols de Thai Nguyen



Carte 37 : Etat d'érosion hydrique des sols de Thai Nguyen



Carte 38 : Indice d'état de la dégradation des sols de Thai Nguyen
 (Érosion hydrique et/ou dégradation *in situ*)

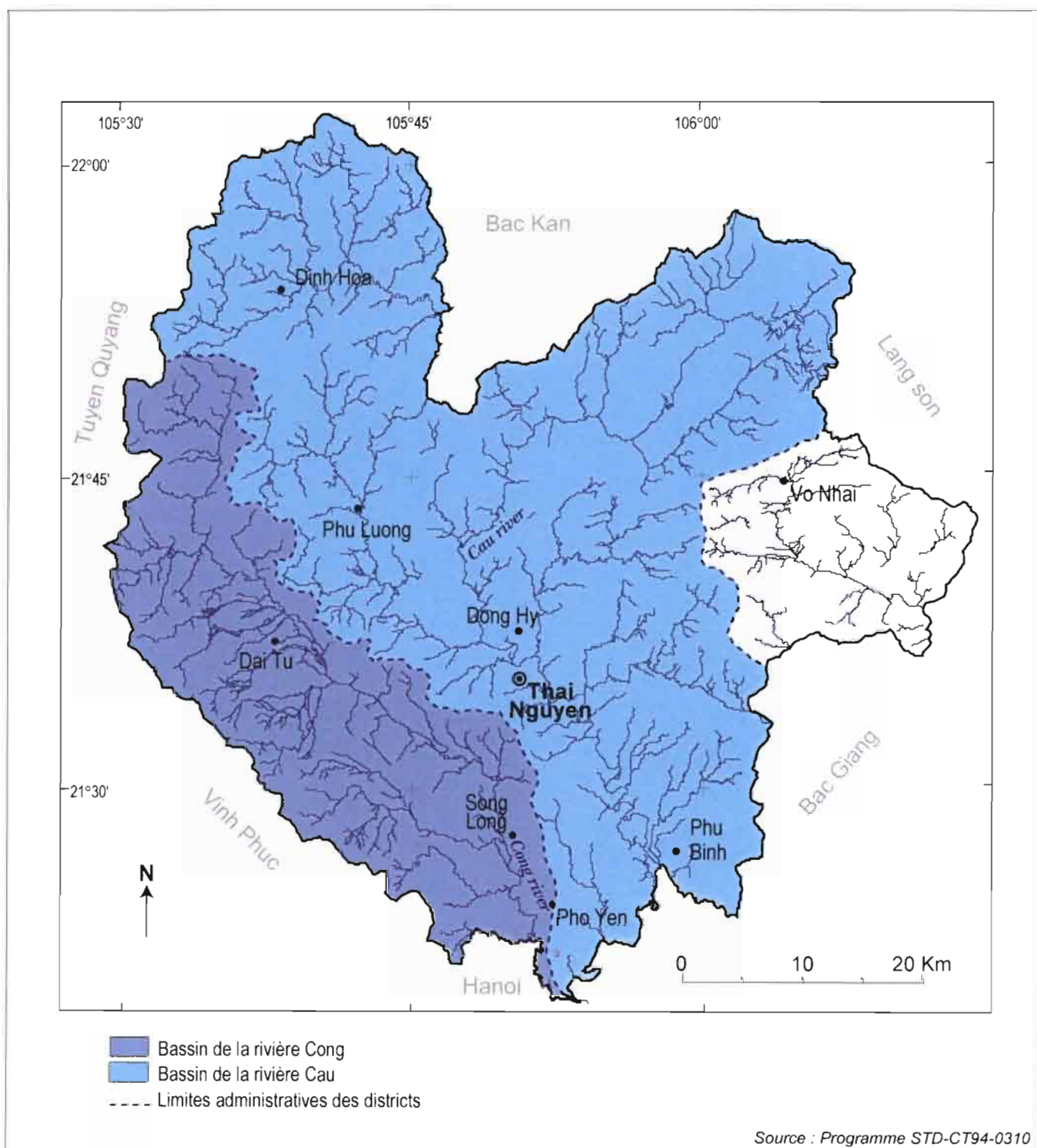


État de la dégradation des sols :

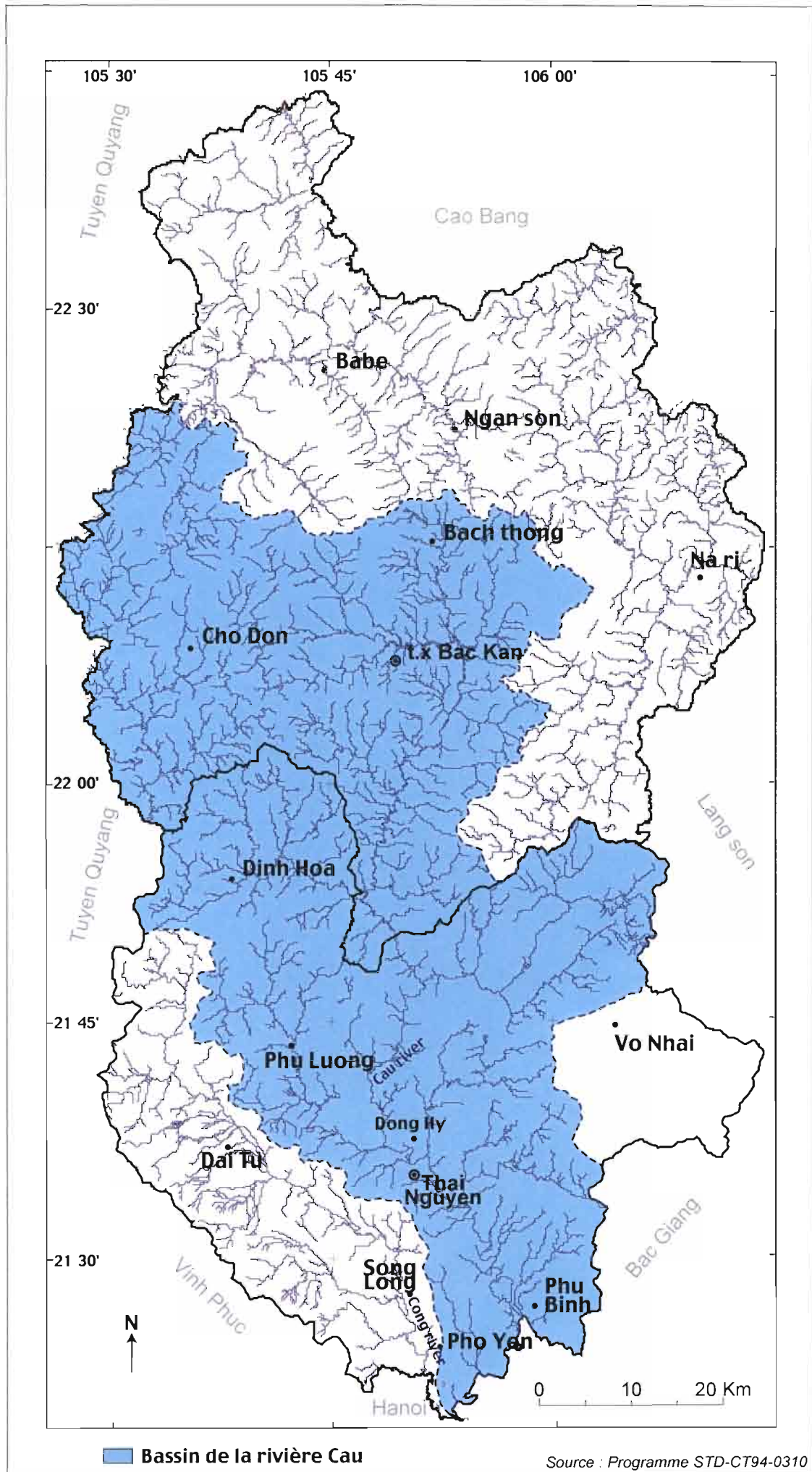
- 1 - Érosion très faible
- 2 - Érosion faible
- 3 - Dégradation moyenne *in situ*
- 3 - Érosion moyenne
- 3 - Érosion et dégradation moyenne *in situ*
- 4 - Forte érosion
- 4 - Forte érosion et dégradation *in situ*
- 5 - Très forte érosion
- 5 - Très forte érosion et dégradation *in situ*
- Limites administratives des districts

Source : P. Brabant (1999)

Carte 39 : Limites des bassins versants des rivières Cau et Cong de Thai Nguyen



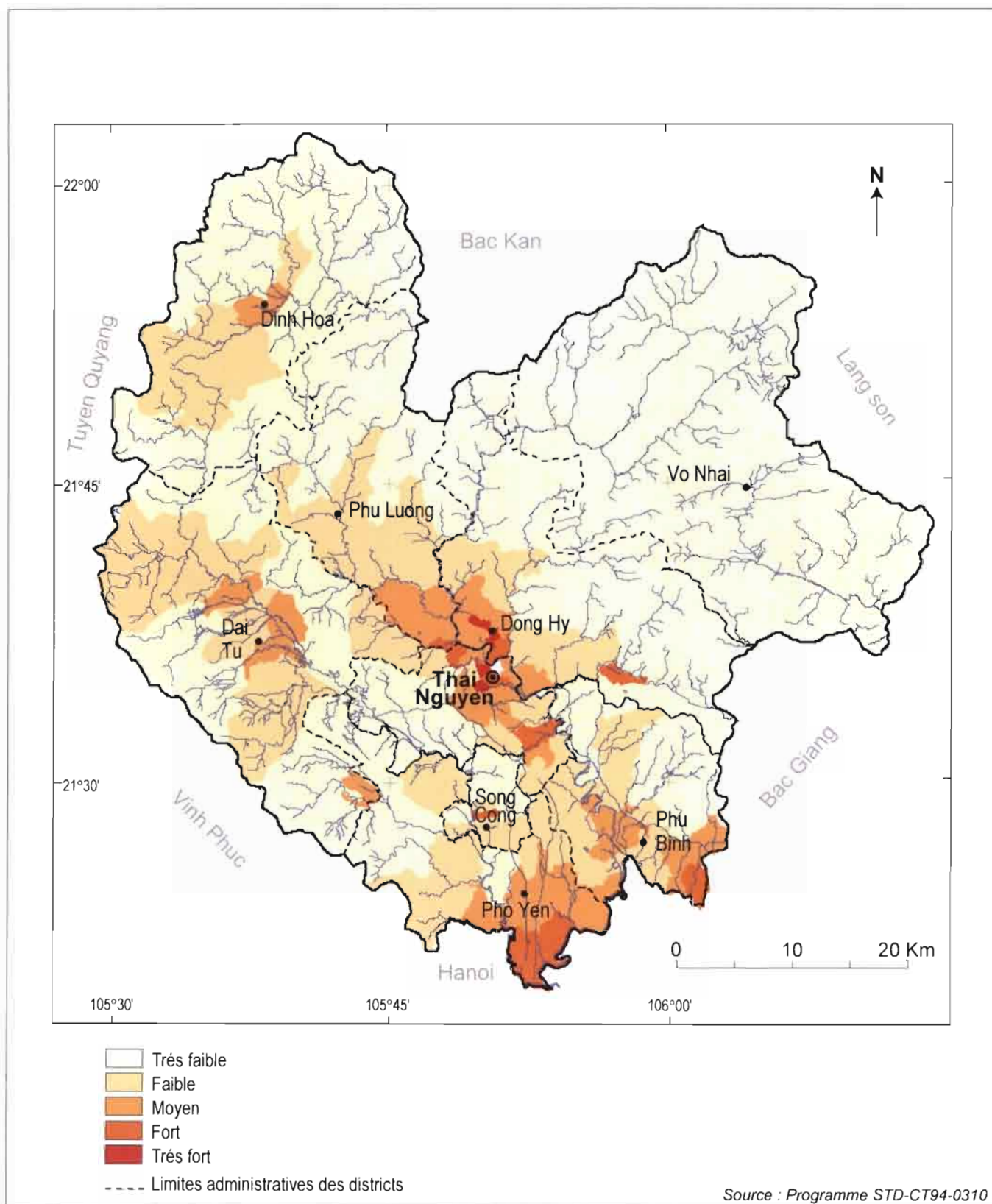
Carte 40 : Bassin de la rivière Cau dans les provinces de Thai Nguyen et de Bac Kan



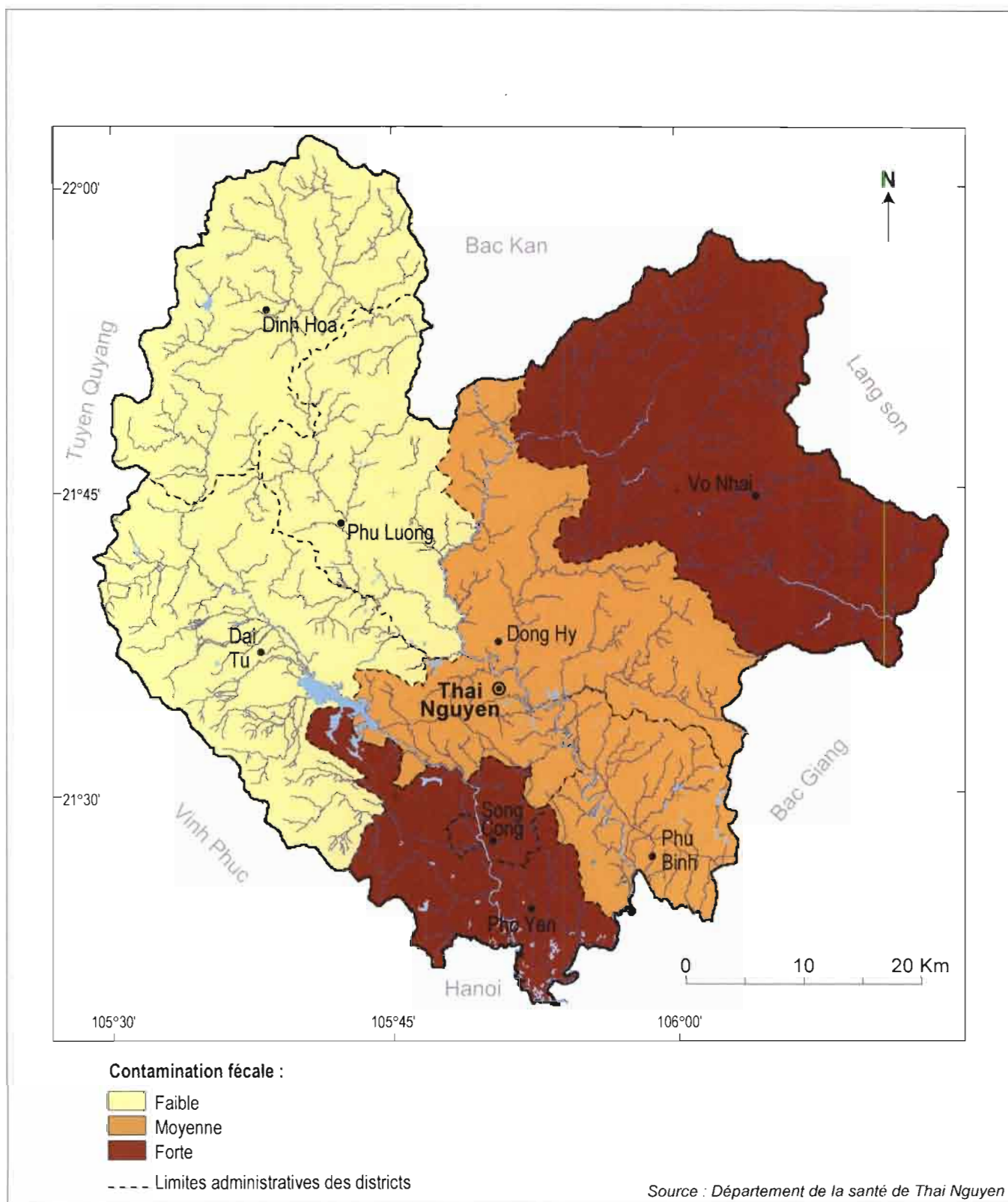
 Bassin de la rivière Cau

Source : Programme STD-CT94-0310

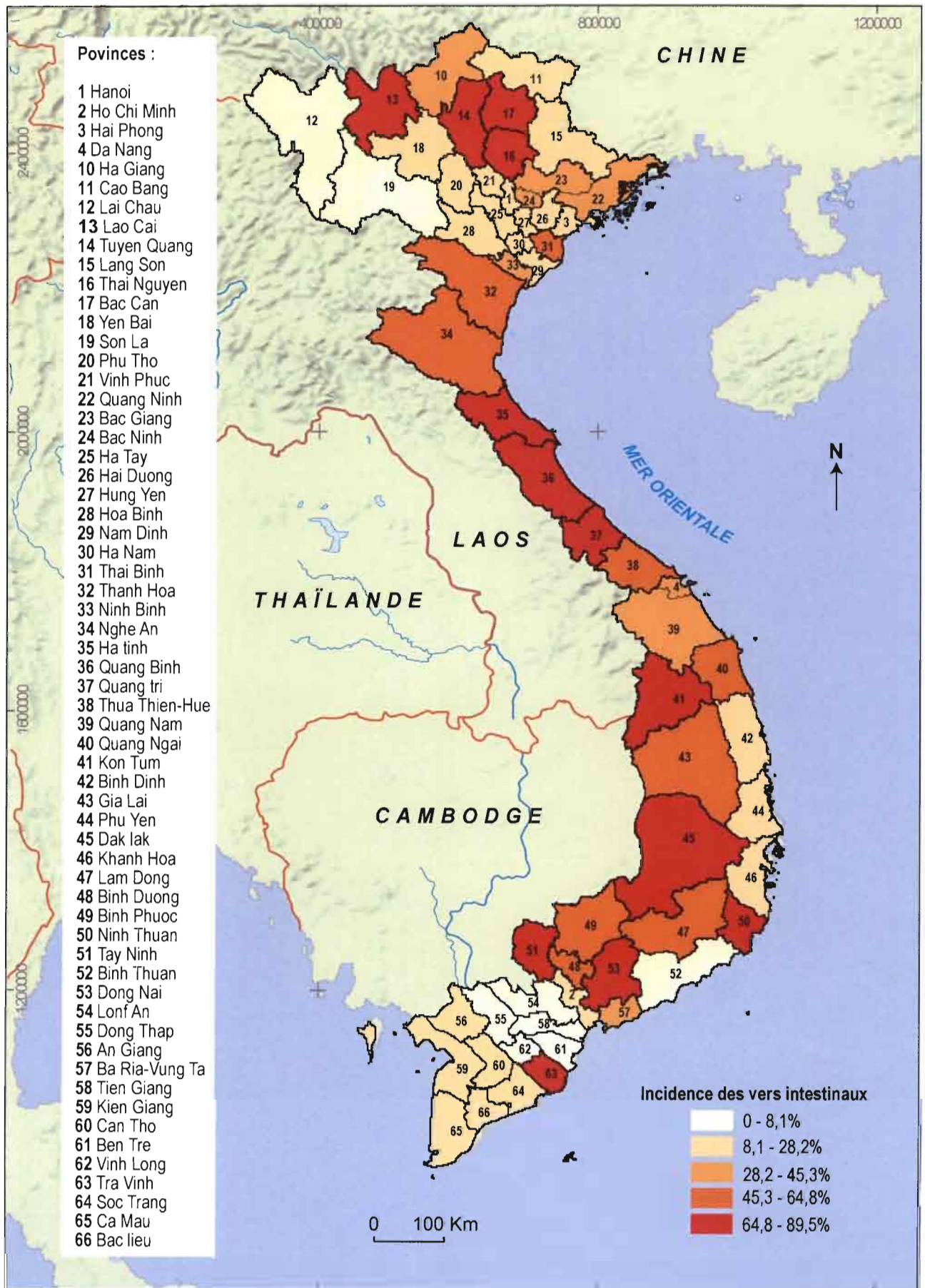
Carte 41 : Indice de risque de contamination fécale de l'eau de Thai Nguyen



Carte 42 : Indicateur d'état de la contamination fécale, par district de Thai Nguyen

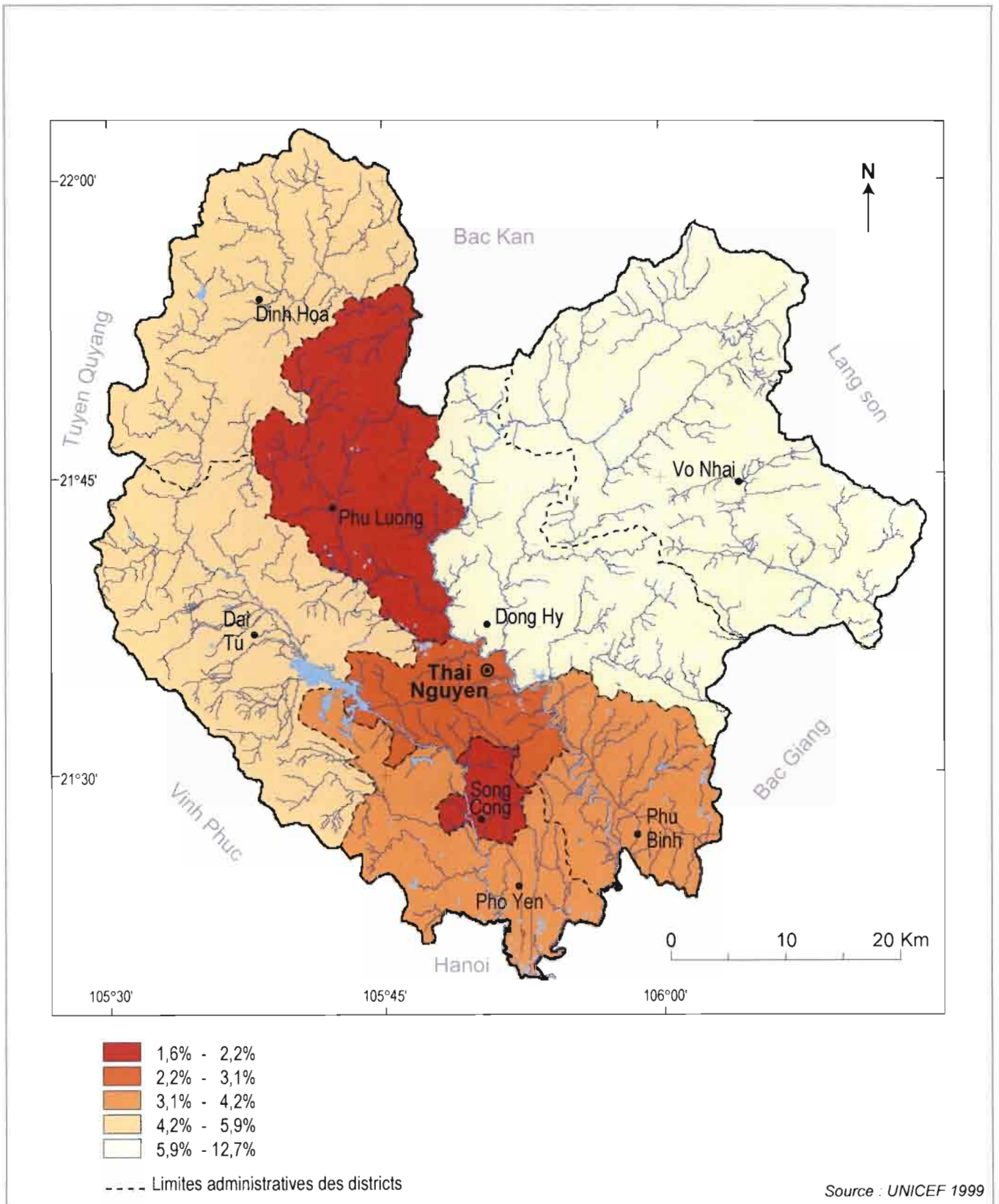


Carte 43 : Incidence des vers intestinaux au Viet Nam



Source : UNICEF / Institut national de nutrition (1995)

Carte 44 : Indice de réponse à la contamination fécale de Thai Nguyen



Annexe II - Photos : paysages, sols, forêts, rivières de la province de Thai Nguyen



P. Brabant

*Zone de transition entre la plaine à riziculture irriguée
et la zone des basses collines*



P. Brabant

Paysage des hautes terres à pentes fortes sur schistes



P. Brabant

Paysage des basses collines



P. Brabant

*Paysage sur schistes avec des vallées étroites
à riziculture irriguée*



P. Brabant

Paysage des hautes collines



P. Brabant

Paysage de karst sur un substrat calcaire

P. Brabant



La rivière Cau en amont de Thai Nguyen

P. Brabant



Le sol est protégé de l'érosion par la végétation arbustive dense (scrubland) qui couvre les friches et jachères après la déforestation²

B. Moeremans



La rivière Cong à l'étiage

P. Brabant



Aspect de la forêt dense

P. Brabant



Sol sur schistes (acrisol) dans les hautes terres¹

P. Brabant



Zone déforestée et abandonnée pour la culture

¹ L'épaisseur du sol dans les hautes terres est en moyenne de 1.5 m. Elle peut dépasser localement 2m, mais elle est fréquemment inférieure à 0.5m dans les terrains en forte pente.

² Cependant le risque d'érosion est élevé quand le sol est peu protégé par la végétation ou les cultures. Dans l'encart, exemple de forte érosion sous une plantation clairsemée d'eucalyptus.

Annexe III : Les principales initiatives pour la mise en place d'une comptabilité de l'environnement

L'importance d'une incorporation de la dimension « Environnement » dans les systèmes de comptabilité nationale (SCN) est fortement soulignée par la Conférence des Nations Unies pour l'environnement et le développement. Le chapitre 8 de l'Agenda 21 indique qu'un « *programme pour développer des systèmes intégrés de comptabilité nationale économique et environnementale est proposé* ».

Bien que de nombreuses et diverses expérimentations soient actuellement menées, aucun pays n'a encore mis en place, à ce jour, une telle comptabilité. Henri M. Persin et Ernst Lutz (1993) ont comparé les différentes approches mises en œuvre pour la comptabilité de l'environnement dans sept pays industrialisés: Allemagne, Canada, Etats-Unis, France, Japon, Pays-Bas et Norvège. L'étude conclut que les approches adoptées diffèrent fortement d'un pays à l'autre, mais qu'aucune n'apparaît comme significativement supérieure aux autres.

Cette diversité provient des deux objectifs distincts que peut poursuivre la comptabilité de l'environnement : (i) une meilleure évaluation de la performance économique ; et (ii) un meilleur système d'aide à la décision. À ce stade, cette hétérogénéité n'est guère préjudiciable, car les données collectées sont similaires et la seule différence réside dans leurs systèmes d'interprétations. Les travaux en matière de comptabilité de l'environnement semblent progresser selon quatre grands axes : (i) intégration des coûts de la dégradation de l'environnement dans le champ de la comptabilité économique traditionnelle ; (ii) élaboration de comptes satellites ou parallèles de l'environnement ; (iii) élaboration d'une comptabilité des ressources naturelles ; (iv) développement d'une comptabilité du patrimoine.

1.1 Élargissement du champ de la comptabilité économique traditionnelle

Cette approche, retenue notamment par le Canada (A. Comolet et R. Perelman, 1991), a pour objectif d'insérer dans le SNC les coûts de protection de l'environnement et de la diminution des ressources naturelles. Les tenants de cette approche soulignent que seule une quantification monétaire de la dégradation de l'environnement et son intégration dans le champ de la comptabilité économique traditionnelle est en mesure de permettre une prise en compte totale de l'environnement dans la prise de décision. Cette approche est difficile à mettre en œuvre du fait de la complexité des problèmes d'estimation de la valeur monétaire des services fournis par l'environnement. L'estimation de la valeur des ressources non renouvelables exige notamment un grand nombre d'hypothèses sur la valeur future de ces ressources. Il n'existe pas à ce jour de méthodologie faisant autorité pour la quantification monétaire des fonctions de soutien à la vie fournies par l'environnement.

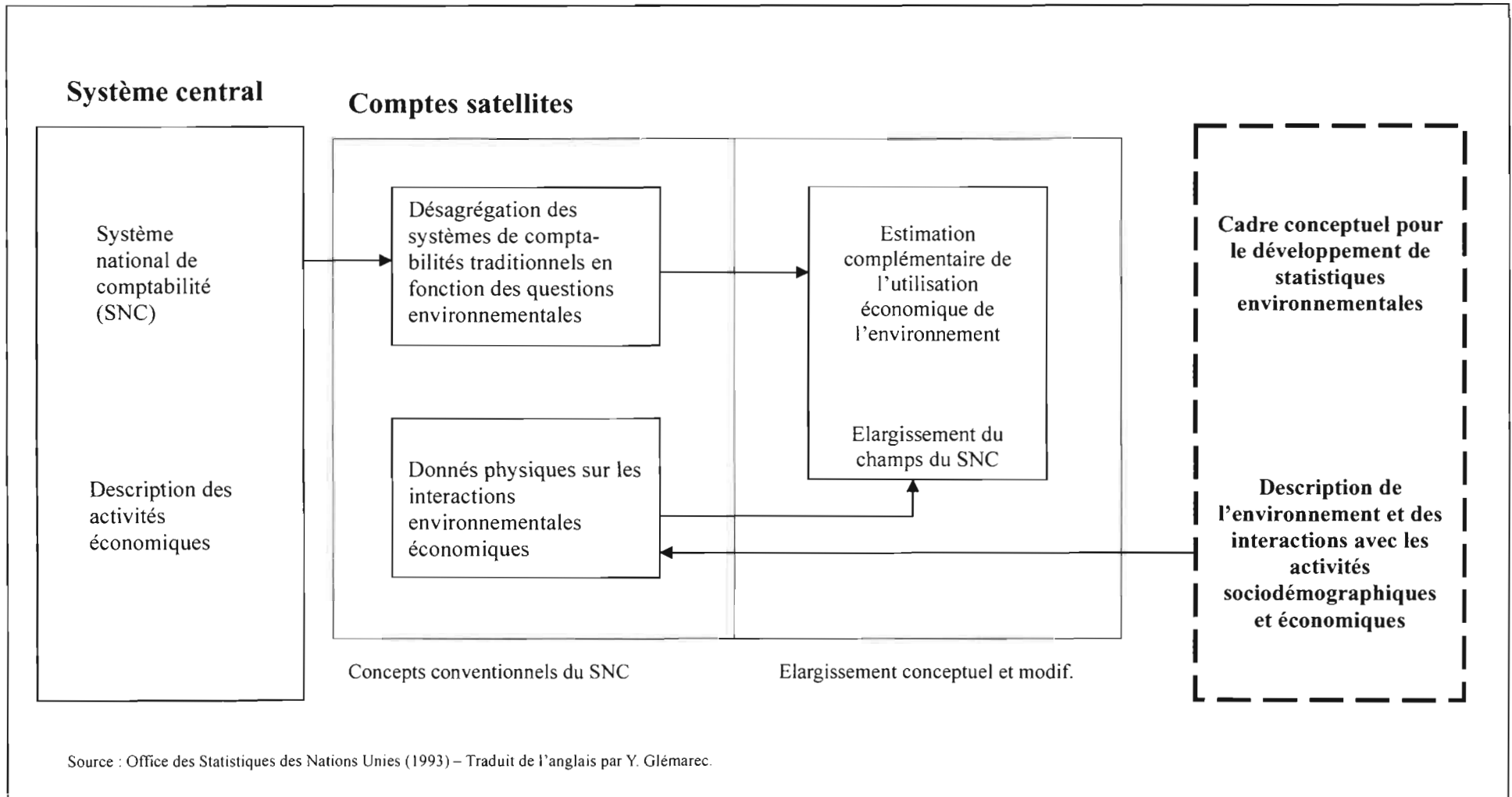
L'approche retenue par le Canada se concentre sur les coûts de la pollution et l'épuisement des ressources naturelles. Par contre, elle ne prend pas en considération les services naturels de l'environnement comme l'assimilation des déchets.

1.2 L'élaboration de comptes satellites de l'environnement

Une alternative à une intégration des comptes de l'environnement à la comptabilité économique traditionnelle est l'établissement de comptes satellites autonomes. Il s'agit de l'approche que le système des Nations Unies et EUROSTAT à la CEE sont en passe d'adopter. L'objectif des comptes satellites ou parallèles est d'étendre le SCN à l'ensemble des flux qui relient l'économie d'une part et l'environnement naturel de l'autre, dans les deux sens. L'approche proposée est schématisée par la figure 24 publiée par l'Office des Statistiques des Nations Unies (1993).

Les comptes satellites sont conçus pour élargir la couverture statistique dans trois directions : (i) la désagrégation des flux monétaires du SCN en fonction de critères pertinents du point de vue de

Figure 24 : Système intégré de comptabilité nationale économique et environnementale (comptes satellites)



Source : Office des Statistiques des Nations Unies (1993) – Traduit de l'anglais par Y. Glémarec.

l'environnement ; (ii) l'identification des flux et des stocks supplémentaires dont on a besoin pour tenir compte des questions d'environnement, et qui seront décrits en unités physiques ; et (iii) l'élaboration de données monétaires supplémentaires sur l'épuisement des ressources naturelles et sur la dégradation de l'environnement.

L'information réunie dans les comptes satellites peut donner lieu à l'établissement d'indicateurs spécifiques qui compléteront les indicateurs macro-économiques traditionnels. L'une des principales applications des comptes satellites est ainsi de permettre d'ajuster le Produit national brut (PNB) et de développer un « PNB vert » afin de mieux déterminer la performance économique réelle d'un pays.

1.3 La Comptabilité des Ressources Naturelles

Cette approche, développée par la Norvège, présente des points communs avec les comptes satellites de l'environnement. Elle a pour objectif d'améliorer la gestion des ressources naturelles en complétant les informations économiques fournies par les comptes et bilans nationaux par un système comptable autonome pour les ressources naturelles. Ce système des ressources naturelles distingue quatre catégories de ressources physiques: ressources minérales, biologiques, renouvelables et environnementales. Le terme de « ressources environnementales » comprend des éléments déterminés de l'environnement qui apportent à la production sociale des services plutôt que des facteurs matériels.

L'idée de base de la comptabilité des ressources naturelles est que les biens et services sont prélevés dans la nature, utilisés pour la production sociale et finalement restitués à la nature après avoir subi des modifications pendant la production et la consommation. Cette idée fondamentale trouve son expression dans les quatre types d'informations collectées pour chaque catégorie: stocks, transformations par les activités humaines, services rendus par les ressources et impact des activités humaines sur les ressources naturelles. La figure 25 publiée par le Conseil Économique et Social des Nations Unies (1991) représente ce concept.

Figure 25 : Principaux concepts de la comptabilité des ressources naturelles de la Norvège

Classes de ressources- Structure de comptabilité des ressources	Ressources minières	Ressources biologiques	Ressources renouvelables	Ressources environnementales
Stocks équivalents	Réserves économiquement accessibles	Populations	Généralement non-applicable	Disponibilité et qualité
Transformations par les activités humaines	Extraction des matériels	Récolte active	Récolte active et passive	Utilisation directe
Services rendus par les ressources	Utilisation des ressources pour la production et la consommation	Utilisation des ressources pour la production et la consommation ; agréments directs	Fonctions de maintien de la vie	Support aux activités ; fonctions de maintien de la vie ; agréments directs
Impact des activités humaines sur les ressources naturelles	Evolution des réserves de base	Dynamique des populations	Généralement non applicable	Modifications de la qualité (comprenant l'élimination des déchets)

Sources : A. Kahnert, *Natural Resource Statistics- An Overview*. In : *Bulletin of the International Statistics Institute, Proceedings of the 44th Session, Madrid, 1983. Volume L. Book 2, Page 1303*. Traduit de l'anglais par Y. Glemarec.

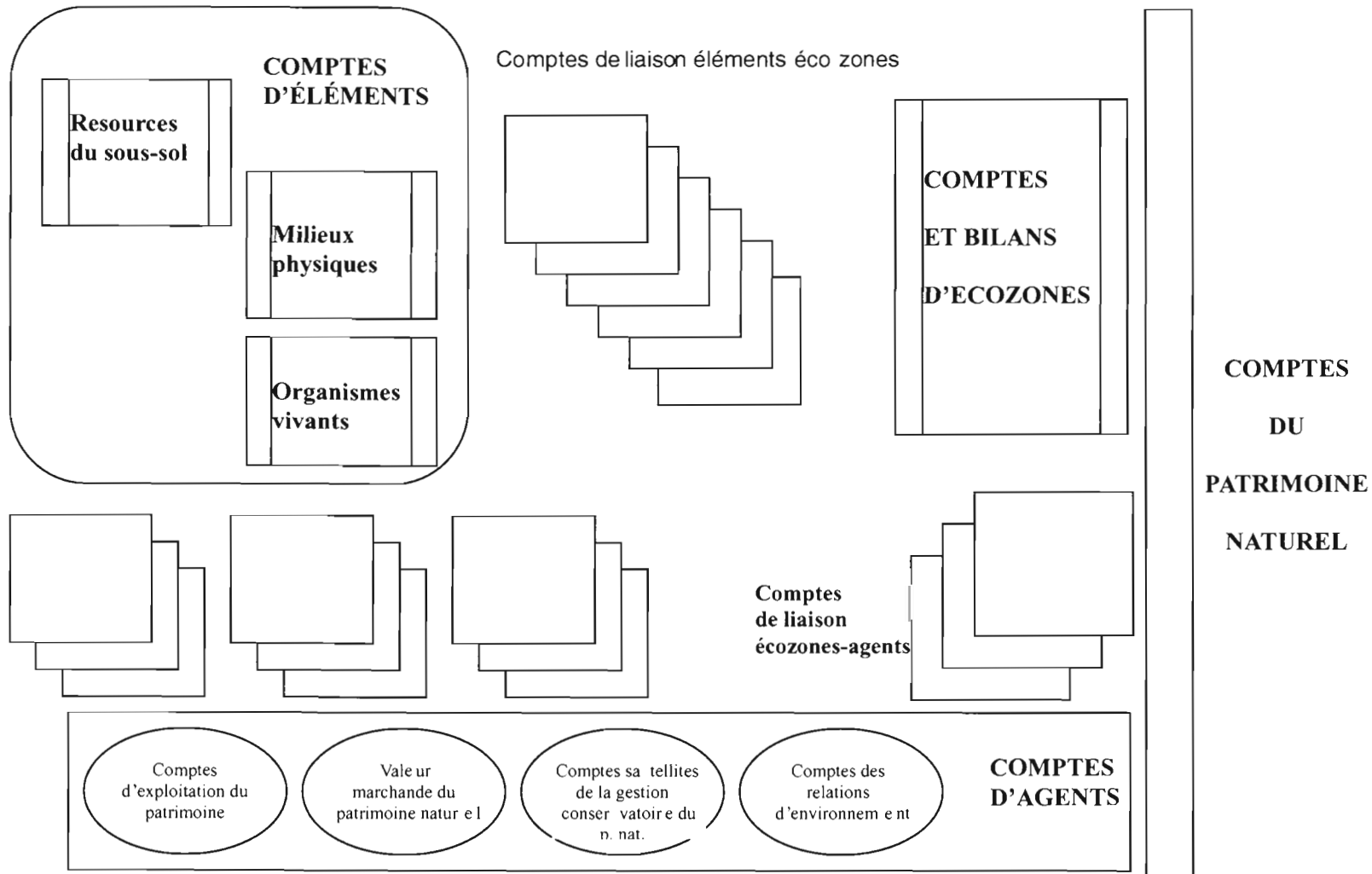
Cette approche concentrée sur le cycle des ressources naturelles a pour objet d'en optimiser l'utilisation. Elle est de ce fait fondamentalement différente de celle qui consiste à classer les utilisations des ressources selon leurs objectifs économiques. Les comptes des ressources naturelles ne prétendent pas à l'exhaustivité et n'ont pas pour objet de mieux mesurer l'efficacité économique ou d'ajuster le PNB. Ils sont essentiellement utilisés par le gouvernement norvégien pour faciliter une gestion durable de ressources naturelles critiques.

1.4 La comptabilité du patrimoine naturel

Le système de comptabilité du patrimoine naturel développé par la France présente certaines similarités avec la comptabilité des ressources naturelles norvégienne. Il est toutefois plus ambitieux en ce sens qu'il entend couvrir à la fois les aspects économiques, sociaux et écologiques de l'environnement. La valeur patrimoniale d'une ressource considère non seulement sa valeur économique mais aussi sa valeur écologique et sociale. Pour reprendre un exemple de M. Toulemon (1987), un espace naturel jusqu'à présent laissé en friche verra sa valeur économique et marchande s'accroître s'il est mis en culture, mais pas nécessairement sa valeur écologique ou paysagère.

La comptabilité patrimoniale essaye de capturer ces différentes dimensions à l'aide de trois types de comptes : (i) les comptes d'éléments qui analysent les facteurs de croissance et de décroissance des différents éléments patrimoniaux ; (ii) les comptes et bilans d'écozones qui mesurent certaines des relations entre les éléments patrimoniaux à l'intérieur d'un écosystème et visent essentiellement à décrire l'état de santé des écozones ; et (iii) les comptes d'agents qui sont destinés à mettre en lumière l'influence de l'homme sur le patrimoine naturel. Pour reprendre la formulation adoptée par la revue le Dossier (1987) «*Les comptes d'agents peuvent être établis en unités physiques ou en monnaie. Les comptes en unités physiques traduisent la pression sur le milieu naturel et l'utilisation de l'élément. Les comptes en monnaie retracent la valeur économique du patrimoine ou les coûts de sa gestion. Ils sont rattachés à la comptabilité économique nationale*». La figure 26 publiée par l'INSEE représente les relations entre ces différents comptes.

Du fait de son ambition, les travaux de comptabilité patrimoniale n'ont pu pour l'instant être complétés que pour certains secteurs, tel que le compte des eaux continentales. Les travaux actuellement achevés se sont concentrés sur des comptes de ressources naturelles proches des comptes norvégiens (E. Lutz, 1993).



CADRE CENTRAL INTEGRÉ DE LA COMPTABILITÉ NATIONALE

- Comptes de flux
- Comptes du patrimoine économique

STATISTIQUE ÉCONOMIQUE NON MONÉTAIRE

- de produits
- d'activités
- de filières ou
- de processus technologique
- de modes de consommation

STATISTIQUE SOCIO CULTURELLE

- démographie,
- budgets temps
- fréquentation du patrimoine naturel

Figure 26 : Structure du système de comptes du patrimoine naturel

Annexe IV : Liste préliminaire des indicateurs du développement durable

CHAPITRES D'ACTION 21	INDICATEURS DES ELEMENTS MOTEURS	INDICATEURS DE SITUATION	INDICATEURS D'ACTION
CATEGORIE - INDICATEURS SOCIAUX			
Chapitre 3 - Lutte contre la pauvreté	- Taux de chômage	- Indice numérique de - Pauvreté. Indice - d'écart de pauvreté - Indice d'écart de - pauvreté au carré - Indice de Gini de - l'inégalité du revenu - Différence entre le - salaire moyens des - femmes et celui des - hommes	
Chapitre 5 - Dynamique démographique et durabilité	- Taux de croissance démographique - Taux net de migration - Indice synthétique de fécondité	- Densité de population	
Chapitre 36 - Promotion de l'éducation, de la sensibilisation du public et de la formation	- Taux de croissance de l'effectif d'âge scolaire - Taux de scolarisation dans le primaire (brut et net) - Taux de scolarisation dans le secondaire (brut et net) - Taux d'alphabétisation des adultes	- Population parvenue en 5ème année d'études de cycle primaire. Nombre moyen d'années d'études. Différence entre les taux de scolarisation masculin et féminin. Nombre de femmes actives pour 100 hommes actifs	- PIB consacré à l'éducation
Chapitre 6 - Protection et promotion de la santé		- Assainissement de base : pourcentage de la population ayant accès à des installations correctes d'assainissement - Accès à l'eau potable - Espérance de vie à la naissance - Poids de naissance suffisant - Taux de mortalité infantile - Taux de mortalité maternelle - Etat nutritionnel des enfants	- Vaccination contre les maladies infectieuses de l'enfance - Fréquence de la contraception - Pourcentage de produits chimiques potentiellement dangereux décelés dans les produits alimentaires - Dépenses nationales de santé consacrées aux soins de santé locaux - Pourcentage du PNB représenté par les dépenses nationales totales de santé
Chapitre 7 - Promotion d'un modèle viable d'établissements humains	- Taux de croissance de la population urbaine - Consommation de carburant pour véhicule à moteur d'origine fossile par habitant - Pertes humaines et économiques dues aux catastrophes naturelles	- Pourcentage de la population dans les zones urbaines - Superficie et population des établissements urbains formels et informels - Surface de plancher par personne - Rapport entre le prix de l'habitation et le revenu	- Dépenses d'équipement par habitant

CHAPITRES D'ACTION 21	INDICATEURS DES ELEMENTS MOTEURS	INDICATEURS DE SITUATION	INDICATEURS D'ACTION
CATEGORIE - INDICATEURS ECONOMIQUES			
Chapitre 2 - Coopération internationale visant à accélérer un développement durable dans les pays en développement et politiques nationales connexes	<ul style="list-style-type: none"> - PIB par habitant - Part nette des investissements dans le PIB - Somme des exportations et des importations en pourcentage du PIB 	<ul style="list-style-type: none"> - Produit intérieur net ajusté pour tenir compte de l'environnement - Part des produits manufacturés dans les exportations totales de marchandise 	
Chapitre 4 - Modification des modes de consommation	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique annuelle par habitant - Part des industries grosses consommatrices de ressources naturelles dans la valeur ajoutée du secteur manufacturier 	<ul style="list-style-type: none"> - Réserves minérales prouvées - Réserves prouvées de combustibles fossiles - Durée de vie des réserves énergétiques prouvées - Intensité de l'utilisation des matières premières - Part dans le PIB de la valeur ajoutée manufacturière - Part de la consommation en ressources énergétiques renouvelables 	
Chapitre 33 - Ressources et mécanismes financiers	<ul style="list-style-type: none"> - Rapport entre le transfert net de ressources et le PNB - Rapport entre le montant total de l'APD versée ou reçu et le PNB 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapport dette/PNB - Rapport service de la dette/exportations 	<ul style="list-style-type: none"> - Part des dépenses de protection de l'environnement dans le PNB - Montant des financements nouveaux ou supplémentaires en faveur du développement durable
Chapitre 34 - Transfert de techniques écologiquement rationnelles, coopération et création de capacités	<ul style="list-style-type: none"> - Incorporation des biens d'équipement - Investissements étrangers directs 	<ul style="list-style-type: none"> - Part des importations de biens d'équipement écologiquement rationnels 	<ul style="list-style-type: none"> - Dons de coopération technique
CATEGORIE - INDICATEURS DE L'ENVIRONNEMENT			
Chapitre 18 - Protection de ressources en eau douce et de leur qualité	<ul style="list-style-type: none"> - Prélèvements annuels sur les ressources en eau souterraines et de surface - Consommation d'eau à usage domestiques par habitants 	<ul style="list-style-type: none"> - Réserves en eaux souterraines - Concentration de coliformes fécaux dans les eaux douces - Demande biochimique d'oxygène dans les nappes d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement des eaux usées - Densité des réseaux hydrologiques
Chapitre 17 - Protection des océans, de toutes les mers et des zones côtières	<ul style="list-style-type: none"> - Accroissement démographique dans les zones côtières - Rejets de pétrole dans les eaux des zones côtières - Rejets d'azote et de phosphore dans les eaux des zones côtières 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendements équilibré maximum des pêcheries - Indice de la concentration d'algues 	

CHAPITRES D'ACTION 21	INDICATEURS DES ELEMENTS MOTEURS	INDICATEURS DE SITUATION	INDICATEURS D'ACTION
Chapitre 10 - Conception intégrée de la planification et de la gestion des terres	- Changements d'utilisations des sols	- Modification des conditions des terres	- Gestion décentralisée des ressources naturelles au niveau local
Chapitre 12 - Gestion des écosystèmes fragiles : lutte contre la désertification et la sécheresse	- Population vivant au-dessous du seuil de pauvreté dans les zones arides	- Indice national mensuel de la pluviosité - Indice de la végétation déterminé par télédétection - Terres atteintes par la désertification	
Chapitre 13 - Gestion des écosystèmes fragiles : mise en valeur durable des montagnes	- Évolution de La population dans les zones de montagnes	- Utilisation durable des ressources naturelles des zones de montagnes - Conditions de vie des populations de zones de montagnes	
Chapitre 14 - Promotion d'un développement agricole et rural durable	- Emploi de pesticides agricoles - Utilisation d'engrais - Taux d'irrigation des terres arables - Consommation d'énergie de l'agriculture	- Terres arables par habitant - Terres touchées par des infiltrations d'eau salées et la sursaturation en eau	- Enseignement agricole
Chapitre 11 - Lutte contre le déboisement	- Taux de déboisement	- Modification des terres boisées	- Pourcentage des terres boisées gérées - Terres boisées protégées en pourcentage des terres boisées totales -
Chapitre 15 - Préservation de la biodiversité biologique		- Espèces menacées en pourcentage des espèces indigènes totales	- Superficie protégée en pourcentage de la superficie totale
Chapitre 16 - Gestion de la biotechnologie respectueuse de l'environnement			- Dépenses de R&D au titre des biotechniques - Réglementation et directives nationales concernant la sécurité biologique
Chapitre 9 - Protection de l'atmosphère	- Emissions de gaz à effet de serre - Emissions d'oxydes de soufre - Emissions d'oxydes d'azote - Consommation de substances contribuant à la destruction de l'ozone	- Concentration de polluants atmosphériques dans les zones urbaines	- Dépenses consacrées à la lutte contre la pollution de l'air
Chapitre 21 - Gestion écologique rationnelle des déchets solides et questions relatives aux eaux usées	- Production de déchets industriels et urbains solides - Déchets ménagers par habitant	- Dépenses au titre de la gestion des déchets - Recyclage et réutilisation des déchets - Elimination des déchets urbains -	
Chapitre 19 - Gestion écologique rationnelle des substances chimiques toxiques		- Empoisonnements graves dus aux produits chimiques	- Nombre de produits chimiques interdits ou sévèrement réglementés

CHAPITRES D'ACTION 21	INDICATEURS DES ELEMENTS MOTEURS	INDICATEURS DE SITUATION	INDICATEURS D'ACTION
Chapitre 20 - Gestion écologique des déchets dangereux	<ul style="list-style-type: none"> - Production de déchets dangereux - Importations et exportations de déchets dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie des terres contaminées par des déchets dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépenses au titre du traitement des déchets dangereux
Chapitre 22 - Gestion sûre et écologique rationnelle des déchets radioactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Production de déchets radioactifs 		
CATEGORIE - INDICATEURS INSTITUTIONNELS			
Chapitre 8 - Intégration du processus de prise de décision sur l'environnement et le développement			<ul style="list-style-type: none"> - Stratégies de promotion du développement durable - Programme de comptabilité environnementale et économique intégrée - Etudes obligatoires de l'impact sur l'environnement - Conseils nationaux du développement durable
Chapitre 35 - La science au service d'un développement durable		<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel de scientifiques et d'ingénieurs pour un million d'habitants 	<ul style="list-style-type: none"> - Scientifiques et ingénieurs s'occupant de R&D pour un million d'habitants - Dépenses de R&D en pourcentage du PNB
Chapitre 37 - Mécanismes nationaux et coopération internationale pour le renforcement des capacités dans les PVD			
Chapitre 38 - Arrangements institutionnels internationaux			
Chapitre 39 - Instruments et mécanismes juridiques internationaux			<ul style="list-style-type: none"> - Ratification des accords mondiaux - Mise en œuvre des accords mondiaux ratifiés
Chapitre 40 - L'information pour la prise de décisions		<ul style="list-style-type: none"> - Principales lignes téléphoniques pour 100 habitants - Accès à l'information 	
Chapitre 23-32 - Renforcement du rôle des principaux groupes			<ul style="list-style-type: none"> - Programmes d'établissement de statistiques nationales sur l'environnement - Représentation des principaux groupes au sein des conseils nationaux du développement durable - Représentation des minorités ethniques et des populations autochtones au sein des conseils nationaux - Contribution des ONGs au développement durable

Annexe V : Analyse des données de qualité de l'eau disponibles pour la rivière Cau

Le Viet Nam n'a pas encore développé de grille détaillée d'appréciation globale de la qualité de l'eau des rivières. À titre d'illustration, le tableau 67 compare les données de qualité de l'eau disponibles pour la rivière Cau à la grille d'appréciation utilisée par l'Agence de bassin ADOUR-GARONNE en France.

Tableau 67 - Évaluation de la qualité de l'eau de la rivière Cau en fonction de la grille Adour-Garonne

Paramètres	1A	1B	2	3	Rivière Cau	
					Thac Buoi	Gia Bay
Conductivité (S/cm à 20 °C)	400	400 à 750	750 à 1500	1500 à 3000		
Température	20	20 à 22	22 à 25	25 à 30	23,8	24,6
PH	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5	6 à 9	5,5 à 9,5	7,16	7,24
MES (mg.l ⁻¹)	30	30	30	30 à 70	245	
O ₂ dissous (mg.l ⁻¹)	7	5 à 7	3 à 5	MAMP ¹		
O ₂ dissous en % de saturation	90%	70 à 90	50 à 70	MAMP ¹		
DBO ₅ (mg.l ⁻¹)	3	3 à 5	5 à 10	10 à 25		
Oxydabilité (mg.l ⁻¹)	3	3 à 5	5 à 8			
DCO (mg.l ⁻¹)	20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	1,290	1,84
NH ₄ (mg.l ⁻¹)	0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8		
NO ₃ (mg.l ⁻¹)			44	44 à 100		
N total (Kjeldahl)	1	1 à 2	2 à 3			
Fe (mg.l ⁻¹)	0,5	0,5 à 1	1 à 1,5		0,44	0,28
Mn (mg.l ⁻¹)	0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,50			
F (mg.l ⁻¹)	0,7	0,7 à 1,7	0,7 à 1,7	1,7		
Cu (mg.l ⁻¹)	0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	1		
Zn (mg.l ⁻¹)	0,5	0,5 à 1	1 à 5	5		
As (mg.l ⁻¹)	0,01	0,01	0,01 à 0,05	0,05		
Cd (mg.l ⁻¹)	0,001	0,001	0,001	0,001		
Cr (mg.l ⁻¹)	0,05	0,05	0,05	0,05		
CN (mg.l ⁻¹)	0,05	0,05	0,05	0,05		
Pb (mg.l ⁻¹)	0,05	0,05	0,05	0,05		
Se (mg.l ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,01		
Hg (mg.l ⁻¹)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005		
Phénols (mg.l ⁻¹)		0,001	0,001 à 0,05	0,05 à 0,5		
Détergents (mg.l ⁻¹)	0,2	0,2	0,2 à 0,5	0,5		
S.E.C (mg.l ⁻¹)	0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	1		
Coliformes (Num.100ml)	50	50 à 5000	5000-50000			
<i>Esch. Coli</i> (Num.100ml)	20	20 à 2000	2000-20000			
Strep.féc. (Num.100ml)	20	20 à 1000	1000-10000			
Ecart de l'indice biotique par rapport à l'indice normal	1	2 ou 3	4 ou 5	6 ou 7		

(Grille utilisée par l'Agence de bassin ADOUR-GARONNE, citée par Degremont, 1989).

Les définitions des différentes classes de qualité de la grille d'appréciation Adour-Garonne sont les suivantes :

- Classe 1A. Eaux considérées comme exemptes de pollution, aptes à satisfaire les usages les plus exigeants en qualité.
- Classe 1B. Eaux d'une qualité légèrement moindre, ces eaux peuvent néanmoins satisfaire tous les usages.
- Classe 2. Qualité « passable » : suffisante pour l'irrigation, les usages industriels, la production d'eau potable après un traitement poussé. L'abreuvement des animaux est généralement toléré. Le poisson y vit normalement, mais sa reproduction peut être aléatoire. Les loisirs liés à l'eau y sont possibles lorsqu'ils ne nécessitent que des contacts exceptionnels avec elle.
- Classe 3. Qualité « médiocre »: juste apte à l'irrigation, au refroidissement et à la navigation. La vie piscicole peut subsister dans ces eaux, mais cela est aléatoire en période de faibles débits ou de fortes températures, par exemple.
- Hors classe. Eaux dépassant la valeur maximale tolérée en classe 3 pour un ou plusieurs paramètres. Elles sont considérées comme inaptes à la plupart des usages et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'environnement.

Certains paramètres physico-chimiques en relation avec la composition naturelle des eaux sont aussi mesurés par les stations de Thac Buoï et de Gia Bay. Ces paramètres sont en général suivis dans le cadre d'une utilisation de l'eau pour l'alimentation en eau potable. Le tableau 68 compare les résultats obtenus pour ces paramètres aux normes CEE et OMS de qualité de l'eau de boisson :

Tableau 68 - Évaluation des paramètres de qualité pour l'alimentation en eau potable de la rivière Cau

Paramètres	Directive CEE (80/779/CEE)		Recommandations OMS (1986)	Rivière Cau	
	Niveau guide	Concentration maximale admissible		Thac Buoï	Gia Bay
Magnésium - Mg (mg.l ⁻¹)	30	50	50	5,3	5,7
Calcium - Ca (mg.l ⁻¹)	100	-	-	25,4	23,1
Sodium - Na (mg.l ⁻¹)	20	150	200	15,5 (Na et K)	9,03 (Na et K)
Potassium - K (mg.l ⁻¹)	10	12	-		
Silice - SiO ₂ (mg.l ⁻¹)	-	-	-	14,9	14,7
Chlorure - Cl (mg.l ⁻¹)	25	-	250	4,8	3,6
Sulfate - SO ₄ (mg.l ⁻¹)	25	-	400	6,8	5,6

On a coutume d'attribuer à une eau la qualité qui est donnée par le paramètre mesuré le plus défavorable (Degremont, 1989). Étant donné le très fort taux de matières en suspension (MES), cet usage nous conduirait à considérer comme hors-classe les eaux de la rivière Cau. Il va de soit que la grille d'appréciation d'Adour-Garonne fut développée pour répondre aux besoins de régions tempérées et que ses critères d'appréciation des MES ne sont guère adaptés aux taux de matières en suspension très élevés communément rencontrés en régions tropicales. Si nous faisons abstraction du taux de MES et de la température moyenne des eaux propres aux régions tropicales, les autres paramètres physico-chimiques disponibles semblent indiquer une très faible contamination des eaux de la rivière Cau. Ces eaux apparaissent exemptes de pollution, aptes à satisfaire les usages les plus exigeants en qualité.

En fait, il est extrêmement difficile d'évaluer la qualité des eaux de la rivière Cau sur la base des seules données disponibles. Elles ne couvrent en effet qu'un nombre très limité de paramètres (pH, DCO, cations, anions). À l'exception de la DCO, elles ne comprennent pas de paramètres fondamentaux de qualité de l'eau comme la DBO, les métaux lourds, les coliformes totaux ou encore les composés organiques persistants.

Les difficultés d'analyse posées par le nombre limité de paramètres sont aggravées par l'absence de données récentes et l'agrégation des données disponibles par le Service National Hydrométéorologique (SH) en des moyennes couvrant parfois des périodes de plus de 20 ans. Ainsi, les moyennes fournies pour les relevés de composition chimique concernent la période 1964-1985 à Thac Bui et 1972-85 à Gia Bay. Le taux moyen de MES à Thac Bui couvre la période 1961-80. Enfin, les températures moyennes fournies au tableau 66 concernent la période 1962-85 à Thac Bui et les années 1962/69/85 à Gia Bay.

Des analyses de la qualité de l'eau effectuées dans huit sites différents de la province de Thai Nguyen et dans trois emplacements de la ville de Thai Nguyen par le SH en Novembre 1995 permettent de compléter quelque peu les indications fournies par les stations de Thac Bui et de Gia Bay. Ces analyses de 1995 comprennent des mesures de demande biologique en oxygène et d'oxygène dissous ainsi que des principaux métaux lourds. Les résultats de ces analyses sont donnés dans les tableaux 69 et 70. Ces analyses semblent confirmer une très bonne qualité des eaux de la province. Sur la base de ces analyses, les eaux de Thai Nguyen étaient presque exemptes de pollution organique et de métaux lourds aux sites testés en novembre 1995. Ces analyses ne comprennent malheureusement pas de mesures de coliformes fécaux et ne peuvent nous renseigner sur la contamination fécale dans ces sites à cette date.

Tableau 69 - Résultats de 8 analyses d'eau prélevées en novembre 1995

Rivière	District	PH	BOD mg/l	DO mg/l	Fe Fe3 mg/l	SO mg/l	NH mg/l	NO mg/l	PO mg/l	F mg/l	Mn Mg/l	Zn mg/l	Cd mg/l	Pb mg/l	Hg mg/l	As mg/l	CN mg/l	Phénol mg/l	Tong Do c mg mg/l	Can Lo l mg mg/l
Song Cong	Dac son	7.6	2.8	9.0	0.250	14.3	0.120	0.01	0.32	0.0015	0.141	0.03	0.0003	0.00127	0.0003	0.009	0.0008	0.0090	0.48	12.81
Ho nni Cee	Nha nghi	7.7	1.8	8.6	0.335	6.20	0.097	0.01	0.41	0.0040	0.082	0.02	0.0004	0.01800	0.0004	0.007	0.0041	0.0075	0.44	8.52
Kenh chinh	Tan Phu	7.6	3.4	9.0	0.182	6.25	0.120	0.01	0.38	0.0010	0.082	0.02	0.0003	0.00110	0.0004	0.007	0.0097	0.0072	0.48	13.58
Song Rong	Vo Nhai	7.3	2.6	9.4	0.168	6.19	0.084	0.02	0.32	0.0040	0.151	0.03	0.0007	0.00194	0.0003	0.009	0.0116	0.0068	1.80	12.60
S. Cho Chu	Cho Moi	7.5	2.8	9.8	0.105	19.2	0.060	0.01	0.53	0.0009	0.060	0.03	0.0006	0.00176	0.0005	0.006	0.0080	0.0068	0.92	12.51
Song Cau	Gia Bay	7.5	3.1	9.2	0.088	8.01	0.097	0.01	0.32	0.0010	0.052	0.03	0.0004	0.00170	0.0004	0.007	0.0190	0.0060	1.00	11.87
Song Du	Pho Du	7.4	1.2	8.6	0.165	7.05	0.060	0.01	0.41	0.0020	0.142	0.03	0.0005	0.00201	0.0002	0.008	0.0080	0.0065	1.08	12.71
Phu luu 13*	Yen Do	7.6	4.1	5.9	0.098	6.25	0.060	0	0.32	0.0010	0.055	0.02	0.0006	0.00226	0.0005	0.006	0.0078	0.0057	1.92	9.95

179

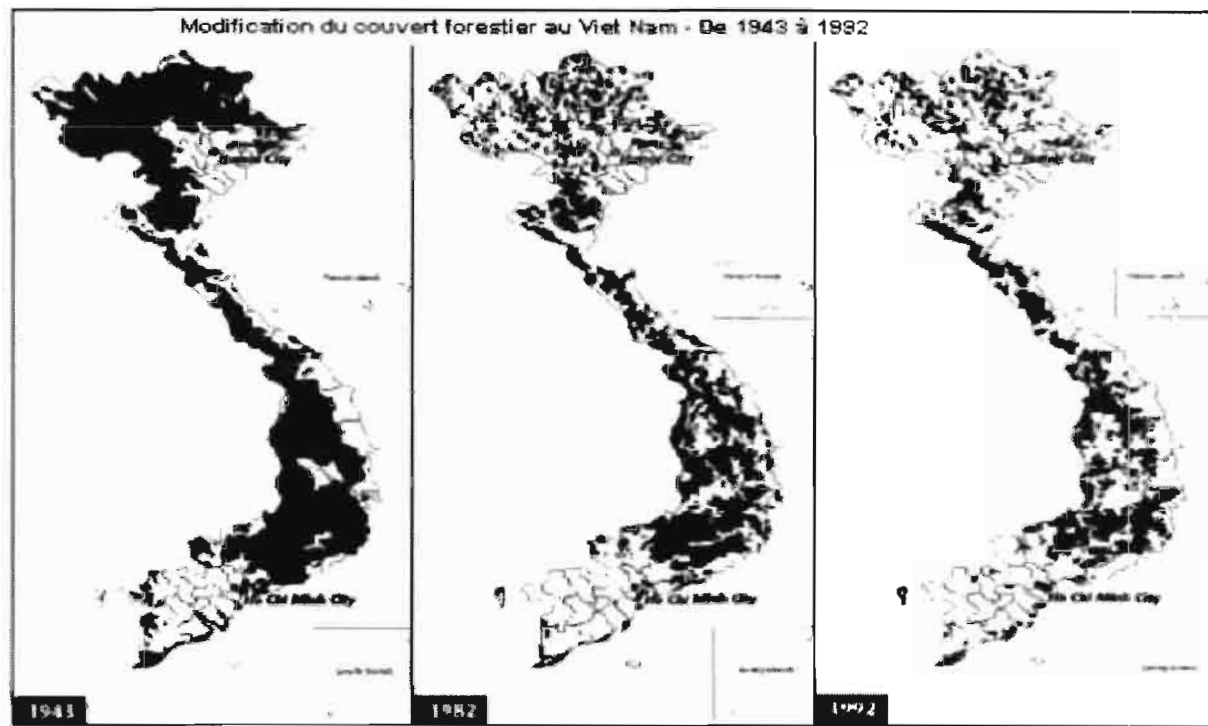
Tableau 70 - Résultats d'analyses d'échantillons d'eau prélevés dans la ville de Thai Nguyen en novembre 1995

Type d'eau prélevée	Lieu de prélèvement	pH	COD mg/l	DO mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	Cd Mg/l	Pb mg/l	Hg mg/l	As mg/l	CN mg/l	Phenol mg/l	H2S mg/l	Tong Do c mg mg/l	Can Lo l mg mg/l
Eau domestique	The Duyen	7.5	19.2	0.71	0.06	0.012	0.0008	0.0009	0.00042	0.006	0.011	0.017	0.002	1.24	3.55
Eau mixte	Khu Gia sang	7.5	17.6	1.28	0.07	0.030	0.0008	0.0014	0.00022	0.009	0.022	0.022	0.00018	1.00	3.41
Eau industrielle	Kenh Gang thep	7.6	4.6	4	0.08	0.021	0.001	0.0013	0.00047	0.008	0.018	0.015	0.0021	1.08	2.55

Annexe VI : Les principales causes de déforestation au Viet Nam

La superficie des forêts du Viet Nam est passé de 67 % du territoire en 1943 à 29 % en 1992 (voir figure 27). Les principales causes de dégradation des forêts naturelles dans les hautes terres du Viet Nam sont : (i) les défrichements agricoles mis en œuvre par les migrants spontanés ou organisés ; (ii) l'agriculture récurrente ; (iii) les feux de forêts spontanés ; (iv) l'exploitation commerciale extractive du bois ; (v) la collecte du bois de feu ; (vi) les insectes, rongeurs et maladies ; (vii) le développement des infrastructures rurales ; (viii) les exploitations minières ; et (ix) les dégradations dues aux conflits militaires.

Figure 27. : Evolution du couvert forestier du Viet Nam de 1943 à 1992



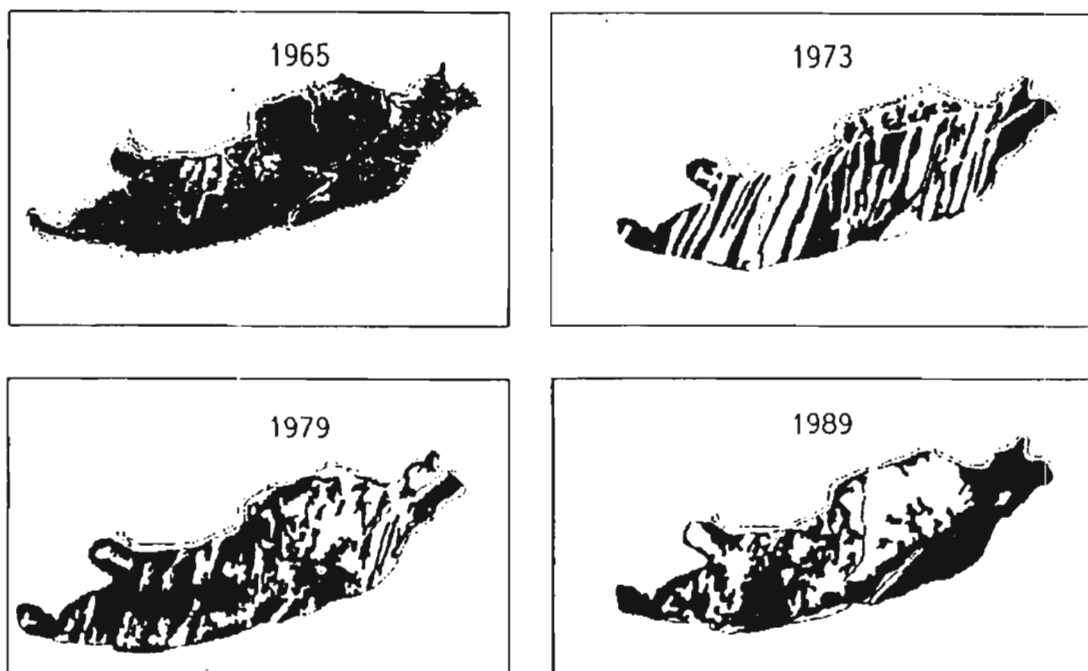
1. *Les défrichements agricoles.* Les migrations organisées ou spontanées de paysans d'origine Kinh des deltas vers les hautes terres du Viet Nam se sont traduites par une forte réduction du couvert végétal et de la qualité des forêts dans ces endroits (CERED, 1994). Peu d'informations sont malheureusement disponibles quant à l'étendue du phénomène.
2. *L'agriculture récurrente.* Pendant des générations, plusieurs minorités ethniques du Viet Nam ont pratiqué une forme durable d'agriculture récurrente. Les champs étaient cultivés pendant quelques années puis laissés en jachères pour de longues périodes. Un tel système agraire ne défrichait de façon temporaire qu'une très faible superficie forestière (moins de deux hectares par essart) et permettait en fait un enrichissement du milieu par l'introduction d'espèces animales et végétales opportunistes. La viabilité de ce système agraire est en grande partie fonction de la densité de population. L'agriculture itinérante est considérée comme viable jusqu'à une densité de population de 50-70 personnes par km² (Banque Mondiale, 1995). Le seuil exact varie suivant la vulnérabilité des sols à la dégradation et le type de cultures pratiquées. La croissance démographique des minorités ethniques et les très forts flux migratoires organisés et spontanés ont rompu l'équilibre des systèmes agraires traditionnels des hautes terres du Viet Nam. Les périodes de jachères ne sont plus assez longues pour permettre une régénération complète des zones défrichées et l'agriculture récurrente est devenue une source majeure de dégradation des forêts.

3. *L'exploitation commerciale extractive du bois.* La législation du Viet Nam exige que les forêts soient restaurées dans leur état d'origine après toute taille. Elle limite aussi de manière draconienne la coupe de certaines essences d'arbres et les exportations en bois tropicaux. L'exploitation des forêts est aussi interdite dans les bassins versants d'une importance critique pour la conservation des sols et de l'eau. Du fait des faibles moyens de protection mis en œuvre et des importants intérêts économiques de l'activité, cette législation n'est malheureusement guère appliquée. Il est estimé que les coupes commerciales légales et illégales du bois dégradent plus de 70 000 ha par an de forêts et entraînent une perte annuelle de plus de 30 000 ha de forêts (MOSTE/UNDP/GEF, 1994).
4. *La collecte du bois de feu.* La demande annuelle en bois de feu est estimée à 50 millions de m³/an au Viet Nam (UNDP/FAO, 1996). La collecte de bois de feu se produit sur une très large échelle et est encore plus difficile à contrôler que l'exploitation commerciale. De nombreux villageois collectent le bois pour le vendre sur le bord des routes. Dans certains villages, le bois est transformé en charbon avant la vente pour faciliter le transport. Bien que très peu d'informations soient disponibles à ce sujet, il semble que la collecte de bois de feu soit la raison majeure de dégradation des forêts et de perte de biodiversité dans certaines zones du Viet Nam (MOSTE/UNDP/GEF, 1994). Les deltas du Fleuve Rouge et du Mékong et les collines du Nord Viet Nam souffrent déjà de pénuries localisées mais importantes en bois de feu pour les usages domestiques et industriels. Dans les zones à forte densité de population, les habitants doivent parcourir parfois 20 à 30 km pour trouver du bois de feu (UNDP/FAO, 1996). En l'absence d'alternative économique à la collecte du bois de feu, toutes les tentatives de contrôle de cette activité ont jusqu'à présent échouées.
5. *Les feux de forêts.* 56 % environ des 9 millions d'hectares de forêts du Viet Nam sont considérés comme sensibles aux feux de forêts. Les feux se produisent le plus souvent en saison sèche quand les vents chauds de l'Ouest sont les plus forts. Les feux sont généralement causés par des activités humaines comme le défrichement agricole, la chasse, l'exploitation minière, la cuisine, et la collecte du miel sauvage par enfumage des abeilles. Il est estimé que de 20 000 à 30 000 hectares sont ainsi brûlés annuellement au Viet Nam (MOSTE/UNDP/GEF, 1994). Plus de 100 000 ha disparaissent durant les mauvaises années. Le développement rapide de plantations de résineux accroît la sensibilité de nombreuses régions au feu spontané.
6. *Développement des infrastructures rurales.* Afin d'attirer les investisseurs nationaux et étrangers, la plupart des provinces du Viet Nam ont initié des programmes ambitieux de développement d'infrastructure routière. Ainsi, la province pilote de Lam Dong a récemment construit 1 744 km de routes, dont 317 km de routes nationales, 390 km de routes provinciales, 119 km de routes municipales, 309 km de routes de district, 494 km de routes communales et 117 km de routes pour « utilisation spéciale » afin de permettre un accès aisé aux nouvelles zones de développement économiques (*Economic Atlas of Viet Nam*, 1997). La construction de routes permet aux sociétés d'exploitation forestières et aux paysans sans terre un accès à des forêts jusqu'alors protégées par leur isolement.
7. *Ravageurs et maladies.* 13 000 ha de forêts, essentiellement des forêts plantées, ont été perdus en 1989 du fait des insectes et maladies au Viet Nam. Malgré des efforts importants, les insectes et maladies parasitaires continuent à dégrader des milliers d'hectares de forêts tous les ans. Les forêts naturelles sont néanmoins très peu affectées et l'impact sur la biodiversité est considérée comme négligeable (MOSTE/UNDP/GEF, 1994). Les dégâts causés par les insectes et les maladies portent essentiellement sur des plantations récentes d'eucalyptus peu adaptées aux conditions locales.
8. *Les exploitations minières et carrières.* Le sol est détruit par les travaux d'excavation. Aux superficies ainsi détruites viennent s'ajouter les superficies occupées par les déblais. Cette forme

de dégradation des forêts est particulièrement importante dans les hautes terres du Viet Nam du fait d'un grand nombre de petites exploitations d'or et d'étain établis en dehors de toute législation.

9. *Les dégradations dues aux conflits militaires.* Plus de 13 millions de tonnes de bombes et 72 millions de litres de défoliants ont été déversés sur Viet Nam par l'armée américaine entre 1964 et 1975. Une partie des forêts de mangrove du Delta du Mékong a été ainsi détruite de même que des zones de forêt tropicale à grande diversité dans le plateau central. La superficie totale des forêts détruites pendant ce conflit est estimée à 2 millions d'hectares. De par leur persistance, les produits défoliants continuent à avoir un impact important sur la santé des populations. Par contre, ils ne sont plus considérés comme nocifs en termes de biodiversité et de qualité des forêts. Les mangroves de Minh Hai dans le delta du Mékong présentent l'un des meilleurs exemples de l'évolution des principaux mécanismes de dégradation des forêts au Viet Nam. Ces mangroves sont parmi les plus riches au monde. Elles furent en grande partie détruites par les défoliants pendant la guerre et restaurées à la fin des années 70 par les brigades forestières et l'armée. Elles furent de nouveau défrichées pour la culture de crevettes dans les années 80. La figure 28 représente les changements de superficie de ces mangroves de 1965 à 1989.

Figure 28 : Evolution de la superficie des mangroves du Minh Hai de 1965 à 1989



Annexe VII : Les principaux mécanismes de l'érosion hydrique

1 LES DIFFERENTS PROCESSUS D'ÉROSION DES SOLS

Les processus de dégradation des sols et d'érosion sont nombreux, leurs causes variées et les facteurs modifiant leur expression sont multiples et parfois contradictoires. E. Roose, dans son ouvrage *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols* (1994) distingue cinq mécanismes d'érosion des sols :

- L'érosion aratoire : Ce type d'érosion est un processus de déplacement de la terre par arrachement, transport et dépôt sans intervention de l'eau. La terre est entraînée par gravité et par simple poussée des instruments aratoires. Le résultat est un décapage de la couche de surface du sol dans le haut des pentes et à la rupture de pente. La terre déplacée par chaque labour et chaque sarclage s'accumule au bas des versants. Des talus d'un mètre de hauteur peuvent ainsi être constitués en 4 à 5 ans
- L'érosion en nappe : Il s'agit du stade initial de l'érosion hydrique. Il est dû à l'arrachement des particules de terre sous l'action de l'énergie des pluies et à leur entraînement par les eaux de ruissellement. Un ruissellement des eaux intervient dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol. Il se forme d'abord des flaques qui ensuite communiquent entre elles par des filets d'eau. Ce ruissellement se traduit fréquemment sous climat tempéré et en région peu accidentée par une érosion en nappe qui consiste en un déplacement peu apparent mais régulier des éléments fins superficiels.
- L'érosion linéaire : Il s'agit du stade avancé de l'érosion hydrique où le ruissellement s'est organisé. La vitesse de ruissellement des eaux s'accroît en fonction de l'agressivité du climat, l'inclinaison de la pente et la rugosité des sols. Au-delà d'une vitesse de l'ordre de 25 cm/seconde, le ruissellement peut non seulement transporter des sédiments fins, mais aussi attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées, où la vitesse augmente rapidement. Il se crée alors une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. On passe alors à l'érosion linéaire (griffes, rigoles et ravines).
- L'érosion en masse : Il s'agit du troisième et dernier mécanisme d'érosion hydrique. Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. L'attaque du sol sur une épaisseur de son profil est causée, non par l'eau de ruissellement, mais par l'eau qui engorge le sol. Les facteurs qui facilitent ces mouvements de masse sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux (présence de limons issues de l'altération des micas) et des roches présentant des plans de clivage ou de fractures préférentielles (argilites, marnes, schistes, roches à micas, gneiss).
- L'érosion éolienne : Bien qu'elle puisse avoir lieu également dans des climats humides lorsque certains mois de l'année sont particulièrement secs (à conditions que le sol soit préparé par des techniques culturales qui pulvérisent la surface du sol), l'érosion éolienne ne se manifeste avec une certaine importance que là où les pluies annuelles sont inférieures à 600 mm, où l'on observe plus de six mois secs, où l'évapotranspiration potentielle dépasse 2000 mm, où les sols sont dénudés et où la végétation passe d'une savane à une steppe à plages de sol dénudées. Il faut aussi que la vitesse du vent dépasse un seuil de l'ordre de 20 km/h sur sols secs. Les phénomènes d'érosion éolienne seront d'autant plus importants qu'il existe des vents forts et réguliers ou des bourrasques prenant des

directions dominantes. Quand ces conditions sont réunies, l'érosion éolienne peut se révéler particulièrement dramatique. La gigantesque érosion éolienne des plaines de l'Ouest des Etats-Unis en 1934 et 1935 (*Dust-bowl*) fut à l'origine de la création d'un Service de Conservation des sols et le point de départ d'un grand effort de lutte contre l'érosion hydrique et éolienne.

2 LES FACTEURS PRINCIPAUX DE L'EROSION HYDRIQUE

L'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion de masse sont les trois mécanismes principaux de pertes de terre dans les zones de collines et de montagnes du Viet Nam. À titre d'introduction, nous présenterons ici les principaux facteurs de l'érosion hydrique à partir de l'équation universelle de Wischmeier et Smith (1978).

L'équation universelle des pertes de sols (Wischmeier et al., 1958; Wischmeier et Smith, 1978) est le modèle d'estimation de l'érosion des sols le plus connu et le plus fréquemment utilisé au monde. Selon ce modèle, l'érosion hydrique est une fonction de l'érosivité des pluies que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend l'érodibilité de sol, la topographie, le couvert végétal et les pratiques antérosives. L'équation est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers zéro (voir 3.2 .1.1).

2.1 Indice d'érosivité des pluies

L'influence des pluies sur l'érosion du sol dépendra essentiellement de deux facteurs: l'énergie cinétique créée par l'intensité des pluies et la durée de cette intensité. Le tableau 71 classe 183 pluies érosives en fonction de leur intensité de chute, et donne l'érosion moyenne par pluie pour chaque classe d'intensité pluviale.

Tableau 71 - Influence de l'intensité des pluies sur l'érosion du sol

Classes d'intensité pluviale (mm/h pendant les 5mn recevant le plus d'eau)	Nombre de pluies	Érosion moyenne (en t/ha)
0 - 25,4 mm	40	3,75
25,4 - 50,8	61	5,95
50,8 - 76,2	40	11,78
76,2 - 101	19	11,44
101,6 - 127	13	34,24
127,0 - 152,4	4	36,32
152,4 - 177,8	5	38,72
228,6 - 254	1	47,93

(Zanesvilles, Ohio, 1934-1942, cité par F. Fournier, Conservation des sols, Conseil de l'Europe).

Wischmeier (1978) a combiné dans un seul indice d'érosivité (EI_{30}) l'énergie de chaque averse multiplié par l'intensité maximale en 30 minutes (en mm/h). Sur un modèle similaire aux isohyètes, des courbes d'iso-érosivité ont ici pu être établies. Comme de telles courbes ne sont pas disponibles pour toutes les régions du monde et que le dépouillement du pluviogramme de chaque averse est une opération minutieuse et fastidieuse, et comme par ailleurs on ne dispose pas toujours de toutes les informations nécessaires sur l'intensité des pluies, de nombreux auteurs ont tenté de simplifier l'estimation de l'indice d'érosivité des pluies.

En dépouillant 20 stations d'Afrique de l'Ouest, situées entre Séfa au Sénégal et Deli au Tchad, et entre Abidjan en Basse Côte d'Ivoire et Allokoto au Niger, Roose (1977) a montré qu'il existait en Afrique occidentale une relation simple entre l'indice d'agressivité annuel moyen et la hauteur annuelle moyenne des pluies de la même période (sur plus de 10 ans).

RAM = HAM x 0,5 + 0,05 en Afrique de l'Ouest
 0,6 en bordure de l'océan sur 40 km
 0,3 à 0,2 en montagne
 0,1 en zone méditerranéenne algérienne
 + 0,01 en zone tempérée océanique

2.2 L'érodibilité des sols

Aux Etats-Unis, Wischmeier et Smith ont calculé des régressions multiples entre l'érodibilité des sols et 23 paramètres différents du sol sous pluie naturelle et sous pluie simulée sur des parcelles de référence. Les parcelles de référence ont été définies comme des parcelles nues de 9 % de pente, 22.2 mètres de long, travaillée dans le sens de la pente et sans enfouissement de matière organique depuis trois ans. Après simplification, il s'avéra que l'érodibilité dépendait principalement du taux en matière organique du sol, de la texture, de la structure du sol et de sa perméabilité. Sur la base de ces travaux, diverses monographies permettent une évaluation rapide du facteur « K » d'érodibilité des sols (voir Roose (1994)). Un bref rappel de la définition donnée aux termes texture et structure et du rôle primordiale joué par les matières organiques dans la structure et la perméabilité du sol permet d'étayer les résultats empiriques de l'analyse statistiques de Wischmeier.

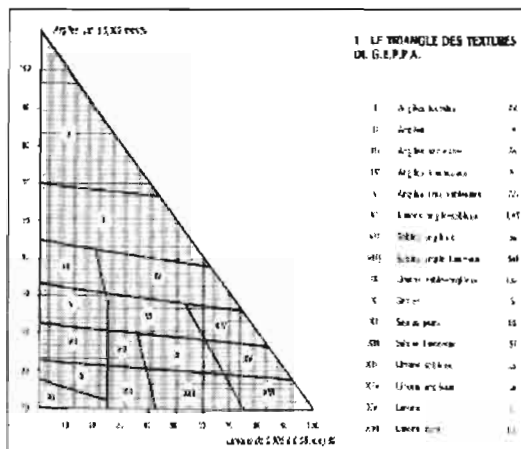
Texture du sol. La texture d'un sol est sa teneur centésimale en sables grossiers et fins, en limons, en argile, en humus et en calcaire (D. Soltner, 1987). L'échelle internationale d'Atterberg, reproduite par le tableau 72, classe ces éléments en fonction de leur taille.

Tableau 72 - Classification internationale d'Atterberg

Diamètre des particules	En mm	en micromètres
Sables grossiers	2 à 0,2	2 000 à 200
Sables fins	0,2 à 0,02	200 à 20
Limons	0,02 à 0,002	20 à 2
Argile	- de 0,002	- de 2

La texture s'exprime par un classement des sols sous l'un des vocables du « Triangle des textures » représenté sur la figure 29.

Figure 29 : Triangle des textures



Structure du sol. La structure d'un sol est le mode d'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solides (D. Soltner, 1987). La forme et la solidité de la structure d'un sol dépendent de la proportion de ses différents constituants, mais aussi de la nature des éléments structurants de ce sol, appelés « les colloïdes du sol ». Les colloïdes du sol proviennent soit de l'altération de la roche mère, comme les argiles, soit de la décomposition des matières organiques, comme l'humus. Ces colloïdes peuvent être soit à l'état dispersé, soit à l'état floculé. À l'état floculé, ils donnent naissance à un complexe argilo-humique qui soude entre eux les différents constituants du sol.

Il existe trois grands types de structure : (i) les structures particulières ou élémentaires, dans lesquelles les constituants solides sont entassés sans aucune liaison, faute de colloïdes ; (ii) les structures compactes ou continues, dont les éléments, noyés dans une masse d'argiles dispersées, ne font qu'un seul bloc ; (iii) les structures fragmentaires, dans lesquelles les constituants, assemblés en agrégats, sont groupés en éléments structuraux plus ou moins gros, offrant plus ou moins de facilité à la circulation de l'air et de l'eau, et donc une perméabilité plus ou moins grande.

La susceptibilité inhérente d'un sol à l'érosion dépendra de sa texture et plus encore de sa structure. Si les sables grossiers dominent, ils laissent entre eux des vides ou circulent aisément l'air et l'eau. Ils offrent peu de résistance au pouvoir dispersant de l'eau et du vent, et sont sensibles à l'érosion. En l'absence d'humus, ces sols présenteront une structure particulière.

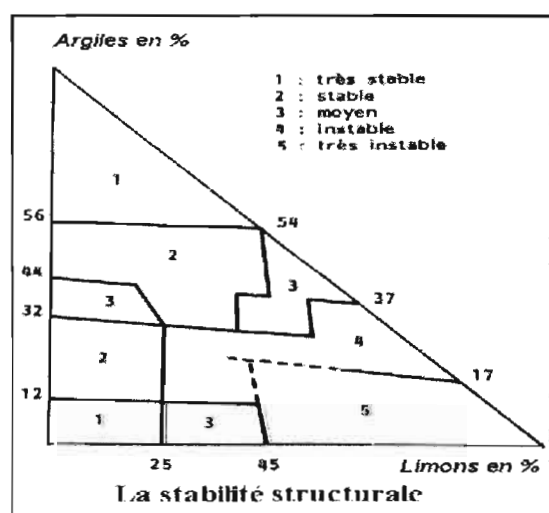
Si des sables fins et des limons accompagnent les sables grossiers, ils colmatent les vides laissés entre ces derniers. Le sol se tasse facilement sous l'effet de la pluie et devient battant et imperméable à l'eau et à l'air. La battante favorise le ruissellement des eaux et l'érosion des sols. Comme les sols légers, ces sols battants présenteront une structure particulière, surtout en absence d'humus.

Si des argiles à l'état dispersé accompagnent les sables, elles tendront à former un mélange homogène avec l'eau et à remplir tous les espaces vides du sol, autour des éléments sableux. De ce fait, ces argiles dispersées perdent leur aptitude à souder solidement les agrégats terreux. Le sol présentera une structure compacte, asphyxiante et sera sensible à l'érosion hydrique.

Si suffisamment d'argile et d'humus structurant accompagnent les sables, ils permettent la formation d'agrégats laissant circuler l'eau et l'air mais soudant les différents constituants du sol entre eux. Les colloïdes permettent au sol d'acquérir une structure fragmentée d'une forte résistance à l'érosion.

Deux sols de même structure peuvent avoir une résistance à l'érosion différente. Alors que la structure d'un sol est l'état de division et d'agrégation de ce sol à un moment donné, sa stabilité structurale est la solidité de cet état, sa résistance aux agents de dégradation. La figure 30 illustre la stabilité structurale d'un sol en fonction de sa texture.

Figure 30 : Stabilité structurale d'un sol à l'érosion en fonction de sa texture



Suite aux travaux de Wischmeier, Singer (1978, rapporté par Roose, 1994) a montré qu'il faut rajouter quelques facteurs supplémentaires comme les teneurs en fer et en alumine, le type d'argile et la salure des matériaux pour pleinement prendre en compte la résistance d'un sol à l'érosion. Connaissant la texture des horizons de surface, leurs taux en matières organiques, les teneurs en fer et alumine libre et le type d'argile, on peut obtenir après quelques observations de profil une première estimation de la résistance des sols à l'érosion en nappe et en rigoles. Comme ces paramètres ne sont pas pris en compte dans les classifications pédologiques de haut niveau, Roose (1994) souligne que l'on ne trouve pas de relation stricte entre l'érodibilité et les différentes classifications pédologiques existantes.

2.3 Le facteur topographique

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion par sa forme, son inclinaison et sa longueur.

La forme des versants. D'après Wischmeier (1974), à pente moyenne égale, une pente gauchie ou concave diminue les transports solides (par sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu. Roose souligne néanmoins qu'il est très délicat d'estimer l'influence de la forme des versants et qu'il existe une large divergence de résultats suivants les auteurs.

L'inclinaison de la pente. Plus le sol est en pente, plus il est sensible à l'érosion. Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante, mais le transport s'accélère vers le bas car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15% (Roose, 1994). Par ailleurs, Zing (1940 cité par Roose, 1994) a mis évidence que les pertes de terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. Aux Etats-Unis, l'exposant est voisin de 1,4 ($A = K.S^{1,4}$) alors que Hudson (1973 cité par Roose, 1994) l'estime à 2 en Afrique.

Le tableau 73 montre que même de faibles pentes (moins de 10 %) peuvent entraîner une forte érosion des sols.

Tableau 73 - Influence de la pente sur le ruissellement et l'érosion

Type de sol	Pluie moyenne annuelle (mm)	Longueur de pente (m)	Degré de pente (%)	Culture	Érosion moyenne annuelle en T/ha	Ruissellement moyen (% des pluies)
1. Limon argileux de Miles (Texas)	526	30	0	Coton	5,43	6,4
			1		12,84	15,1
			2		17,29	15,5
2. Limon fins de Muskingum (Ohio)	926	22	8	Maïs	148,25	30,4
			12		180,87	42
3. Argile de Houston (Texas)	889	22	2	Maïs	26,18	13,4
			4		75,11	16,6
4. Limon finement sableux de Kirvin (Texas)	1041	22	8,75	Coton	68,94	20,9
			16,5		177,90	14,6
5. Limon de Shelby (Missouri)	940	27,5	3,7	Maïs	48,67	29,4
			8		170,00	28,3

(Études faites en parcelles expérimentales dans 5 stations de conservation des sols des Etats-Unis, et citées par F.Fournier).

La longueur de la pente. En théorie, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse, acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes. Ainsi Zing (1940) trouve que l'érosion croît par un exposant 0.6 avec la longueur de pente alors qu'Hudson estime qu'une plus haute valeur de l'exposant est plus appropriée en région tropicale.

Après avoir examiné 532 résultats annuels sur parcelles d'érosion, Wischmeier conclue néanmoins que les relations entre l'érosion et la longueur de pente varient plus d'une année à l'autre que d'un site à l'autre. Il estime que l'importance de l'exposant (de 0,1 à 0,9) est fortement influencée par l'évolution du sol, la couverture végétale, l'utilisation des résidus de cultures, etc.

De même que pour le facteur « K », diverses monographies permettent d'estimer rapidement le facteur topographique en fonction de la longueur et de l'inclinaison de la pente (voir Roose, 1994).

2.5 Influence du couvert végétal et des techniques culturales (C)

Pour arrêter l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes de l'année où les pluies sont les plus agressives, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité à la surface du sol. Roose (1994) souligne que parmi les facteurs conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisque l'érosion passe de 1 à 1 000 tonnes lorsque toutes choses étant égales par ailleurs, le couvert végétal d'une parcelle diminue de 100 % à 0 %.

Autant une utilisation des sols en accord avec leur vocation peut permettre de compenser une susceptibilité inhérente à l'érosion, autant le déboisement et des pratiques inadaptées en accentueront la propension.

Le déboisement. Les rôles de l'arbre sont multiples: production de matériaux de construction et de bois de feu, régulation du régime hydrologique et du climat, conservation des sols, maintien de la biodiversité, et provision de sites de récréation pour les populations. Plus les pentes sont accentuées, plus le rôle de conservation des sols devient critique.

La forêt, de par son excellente couverture du sol, protège le sol contre l'impact des gouttes d'eau et ralentit les filets d'eau, leur donnant le temps de s'infiltrer. Des recherches menées au Viet Nam sur des pentes de 10 à 15 % ont estimé les variations de ruissellement des eaux et d'érosion suivantes en fonction du couvert forestier des sols :

Tableau 74 - Influence du couvert forestier sur l'érosion des sols au Viet Nam

Couvert forestier (%)	Ruissellement (m3/ha)	Érosion (T/ha)
100	44	1
30-40	62	-
0	2 000	100

(D'après - SVR Tropical Forestry Action Plan, Protection Forest, Towards 2000 - Ministry of Forestry- Hanoi, 1988).

Dans le cas de ces expérimentations menées au Viet Nam, la destruction complète d'un couvert forestier dense s'est traduite par une augmentation de 5 000 % du ruissellement des eaux et de 10 000 % de l'érosion des sols (Ministry of Forestry, 1988).

La forêt permet aussi le maintien d'une bonne structure du sol par son action sur le cycle des bases (remontées en surface par les racines des bases lessivées), par l'apport d'humus et par son système racinaire dense et profond. En milieu tropical, le cycle biogéochimique fonctionne parfaitement sous forêt dense. Même sur sols ferrallitiques, les moins naturellement fertiles, la forêt peut prospérer remarquablement en circuit fermé. Sur sols ferrallitiques, une déforestation se traduit rapidement par une érosion d'autant plus forte que le sol est pauvre en humus et par une acidification du sol faute d'une remontée suffisante de bases. Cette acidification contribue à solubiliser les oxydes de fer, qui peuvent alors soit remonter dans le profil soit se déplacer vers des noyaux de cuirassement ferrallitiques.

Pratiques culturales inadaptées. Plusieurs pratiques culturales sont particulièrement nocives, du point de vue de la conservation des sols, telles que :

L'absence de couvert végétal durant la période de pluies orageuses : plus est sol est couvert, plus il résiste à l'érosion. Toutes les cultures n'ont pas le même pouvoir anti-érosif. Des cultures comprenant de larges intervalles désherbés, comme le maïs ou le coton, ne recouvrent que très partiellement le sol et sont particulièrement érosives. Au Texas et au Missouri, sur pente de 8 à 9 %, il a été calculé que le temps nécessaire à l'enlèvement de 20 cm de sol, était de 46 et 50 ans sous coton et sous maïs, contre 27 000 ans sous forêt et 170 000 ans sous prairie (cité par Soltner, 1987).

La simplification des assolements et des rotations : la monoculture et la dissociation agriculture-élevage privent le sol d'apports humifères indispensables au maintien de sa structure. Elle limite aussi l'action de divers systèmes racinaires sur cette même structure du sol. Le tableau 75 illustre l'influence des cultures et de la rotation sur la résistance des sols à l'érosion.

La mise en culture de sols fragiles : la mise en culture de sols qui devraient, du fait de leur pente ou de leur très faible fertilité naturelle, être maintenus sous prairie ou sous forêt, est une cause majeure d'érosion des sols. Cette situation se rencontre souvent dans des régions soumises à une forte pression des populations sur les ressources naturelles.

Le surpâturage : un milieu n'est capable de nourrir qu'un nombre donné d'herbivores, nombre qui dépend de la nature du sol, du climat et de la végétation. Si ce nombre limite est dépassé, l'excès de broutage et de piétinement détruit le couvert végétal et la structure superficielle du sol. Le sol dénudé et déstructuré est ensuite exposé à l'érosion hydrique et éolienne. Plus un milieu se fragilise, plus il est sensible au surpâturage.

Tableau 75 - Influence de la culture et de la rotation sur la résistance du sol à l'érosion

Système de culture	Perte annuelle moyenne pluie (%)	Perte annuelle moyenne de terre en T/ha	Nbre d'années nécessaires pour éroder 17,5 cm de sol
Jachère labourée	30,3	41,1	24
Maïs en culture continue	29,4	19,7	50
Blé en culture continue	23,3	10,1	100
Mais, blé, trèfle en rotation	13,8	2,8	368
Blue grass en culture continue	12,0	0,3	3 043

(D'après Miller cité par D. Soltner).

Le tableau 76 présente des résultats obtenus pour le facteur végétal « C » en Tunisie. Ces résultats qui varient de 1 sous terre nue à 0,01 sous pâturages améliorés rendent bien compte de l'influence fondamentale du couvert végétal dans les mécanismes d'érosion.

Tableau 76 - Influence du facteur couvert végétal (C) en Tunisie

Couvert végétal	C annuel moyen
- sur terre nue, jachère nue	1
- arboriculture fruitière	0,9
- blé d'hiver	0,7
- assolement céréalière	0,4
- fourrages	0,2
- assolement céréalière + fourrages	0,1 à 0,01
- pâturages améliorés	0,01

(d'après Cormary, Masson, 1964, cité par Roose, 1994).

2.6 L'influence des pratiques anti-érosives (P)

Les pratiques anti-érosives ont pour objet de réduire le ruissellement des eaux et les coûts associés à l'érosion. Elles comprennent les techniques culturales mises en œuvre exclusivement dans cet objectif et les structures anti-érosives.

Techniques culturales anti-érosives. Les techniques les plus répandues sont : (i) la culture en courbes de niveau ; (ii) le billonnage en courbes de niveau ; (iii) la culture en bandes en courbes de niveau, isolées par des bandes d'arrêt enherbées ; (iv) le paillage naturel ou artificiel ; (v) le paillage artificiel avec des produits comme l'acétate de polyvinyle ; et (vi) les plantes de couvertures (légumineuses).

Les structures anti-érosives: Il existe quatre modes de gestion de l'eau auxquels correspondent des structures anti-érosives : (i) la capture du ruissellement pour l'irrigation d'appoint (ex : barrage avec culture du réservoir après infiltration) ; (ii) l'infiltration totale (ex : les gradins ou terrasses méditerranéennes) ; (iii) la diversion des eaux excédentaires (ex : fossés de drainage) ; et (iv) la dissipation de l'énergie de ruissellement pour maintenir sa vitesse inférieure à 25 cm/s (les bandes d'arrêt enherbées, les cordons de pierres, etc.).

Le tableau 77 met en parallèle des résultats acquis en Afrique de l'Ouest (Roose, 1994) à partir de techniques biologiques (paillage, plantes de couverture) et de techniques mécaniques (bourelets de terre, billonnage, etc.). Ce tableau montre de façon claire que les techniques biologiques sont bien plus efficaces que les techniques mécaniques, plus coûteuses à implanter et difficiles à entretenir.

Tableau 77 - Le facteur « pratiques antiérosives P »

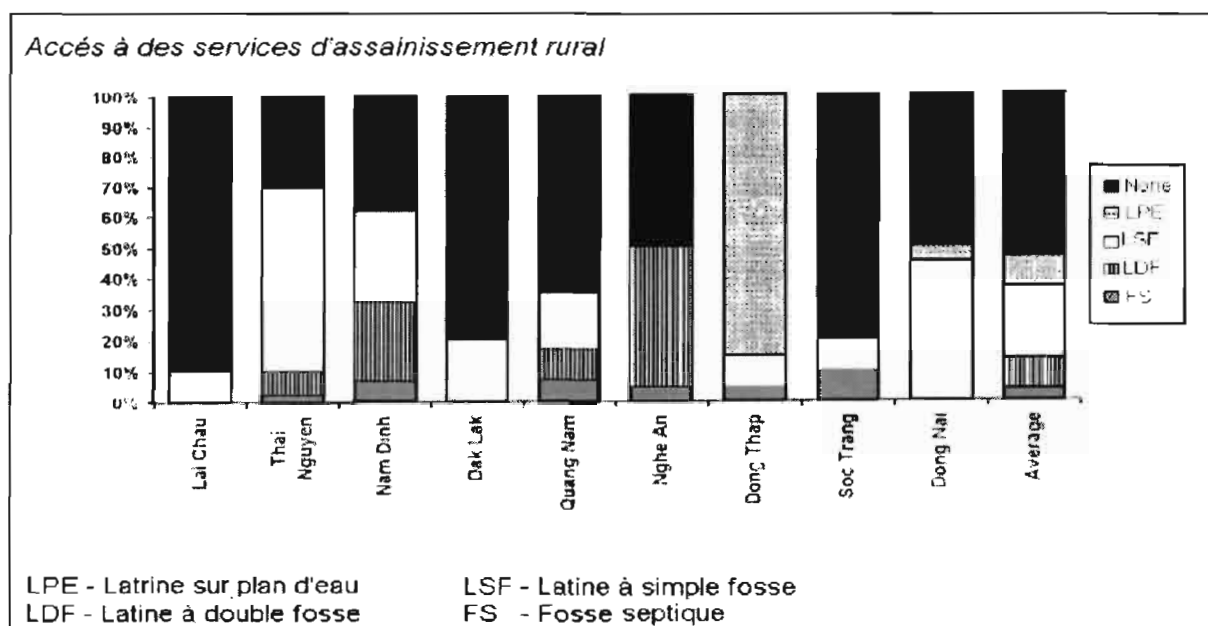
Afrique de l'Ouest (d'après Roose, 1977)	Le facteur « pratiques anti-érosives P »
- billonnage isohypse cloisonné	0,2 à 0,1
- bandes antiérosives de 2 à 4 m de large	0,3 à 0,1
- mulch de paille de plus de 6 t/ha	0,01
- mulch artificiel	0,5 à 0,2
- prairie temporaire ou plante de couverture	0,5 à 0,01
- bourrelets de terre armés de pierres ou lignes d'herbes pérennes ou murettes en pierres sèches tous les 80 cm de dénivelé + labour isohypse + binage plus fertilisation	0,1 à 0,05

Annexe VIII : Principales sources de pollution de l'eau dans les hautes terres du Viet Nam

Il existe très peu d'informations accessibles au public sur la pollution de l'eau au Viet Nam. Sur la base de rapports récents du Gouvernement vietnamien et d'organisations internationales, les sources de pollution suivantes peuvent être identifiées : (i) contamination fécale ; (ii) pollution domestique et industrielle ; (iii) engrais et insecticides ; (iv) sédimentation ; et (v) industries minières.

Contamination fécale. Dans la majorité des hautes terres du Viet Nam, la défécation en plein air est la norme. Comme indiqué dans la figure 31, plus de 90 % de la population de la province de Lai Chau au Nord Viet Nam a recours à la défécation en plein air. À Thai Nguyen, la défécation en plein air concerne près de 30 % de la population. Les autres pratiques sanitaires communément rencontrées dans les hautes terres posent aussi des problèmes de pollution de l'eau. En l'absence d'un temps de compostage adéquat, l'utilisation comme amendement agricole des excréta humains provenant des latrines à double cuve est à l'origine d'une forte contamination fécale. Les eaux résiduelles des fosses septiques situées dans des zones alimentées en eau par des aquifères de surface posent aussi des risques importants pour la santé des populations (DANIDA/CERPAD, 1997). La très forte incidence des diarrhées et des parasitoses intestinales suggère une contamination fécale de l'eau très importante dans les hautes terres du Nord Viet Nam.

Figure 31 : Prévalence des différentes pratiques sanitaires dans 10 provinces du Viet Nam



En ce qui concerne les zones de plaines, le PNUD a effectué des mesures mensuelles des coliformes fécaux dans 31 sections des fleuves du Mékong et du Bassac à la fin des années 80 (UNDP, 1989). Les mesures variaient de 1 500 à 3 000/100 ml sur les berges des deux fleuves et de 3 800 à 12 500/100 ml dans les principaux canaux d'irrigation et de drainage.

Ces chiffres indiquent une contamination fécale considérable²⁰.

Rejets domestiques et industriels. Bien que les données sur ce sujet soient limitées, il semble que la pollution organique des eaux (demande en oxygène) soit relativement limitée. Ceci s'expliquerait par le fait que la plupart des grands centres urbains et industriels déchargent leurs eaux usées dans des fleuves à

²⁰ Les normes de l'OMS pour les coliformes fécaux sont de zéro pour l'eau de boisson et un maximum de 1000/100 ml pour l'eau d'irrigation.

fort débit et au pouvoir d'assimilation des déchets importants. Ainsi, un projet du PNUD (1996) pour le contrôle de la pollution industrielle a montré que l'ensemble des rejets du complexe industriel de Viet Tri au nord d'Hanoi était naturellement assimilé par le Fleuve Rouge après quelques kilomètres. Selon la revue sectorielle de l'eau du Viet Nam (*World Bank, ADB, FAO, UNDP, 1996*), la pollution organique potentielle de tous les investissements industriels approuvés de 1989 à 1993 au Viet Nam équivaldrait à la pollution domestique annuelle d'une petite ville de 18 000 habitants. Bien que la pollution industrielle soit appelée à s'accroître considérablement dans les années à venir, ces chiffres montrent clairement la prédominance des rejets domestiques par rapport aux rejets industriels en matière de pollution organique.

Sédimentation. Les processus de dégradation des eaux sont intimement liés aux processus de dégradation des sols et des forêts. L'érosion des sols et le déboisement se traduiront par une sédimentation des barrages et réservoirs, une augmentation du ruissellement et, dans certains cas, des inondations. En effet, une conséquence directe de la sédimentation est l'envasement des réservoirs. Pour comprendre l'ampleur des phénomènes d'envasement, il convient de garder en mémoire que la perte d'un millimètre d'épaisseur de sol par hectare correspond à l'entraînement de 10 m³ ou encore de 13 tonnes de terre. La sédimentation des cours d'eau oblige le Viet Nam à relever périodiquement la hauteur de ses 5 000 kilomètres digues de protection contre les crues. Du fait de l'accumulation de sédiments au cours des siècles, le niveau du lit de la rivière peut être de 5 à 6 mètres au-dessus de celui des terres avoisinantes dans certaines zones de plaine du Viet Nam (T. Lustig, M. Silver, Y. Glemarec, T. Aadmot, 1994).

En outre, la sédimentation entraîne une augmentation des coûts de traitement de l'eau de boisson. Les particules de sol et les éléments fertilisants transportés par les eaux de ruissellement affecteront leur qualité. L'eau turbide est aussi difficile et onéreuse à filtrer et sa désinfection exige de plus fortes doses de désinfectants chimiques (Jain, 1993).

Près de 80 % des sédiments sont charriés pendant la saison des pluies. La turbidité de l'eau varie fortement d'une région à l'autre. Les plus fortes concentrations sont enregistrées dans les sections amonts des Fleuves Rouge et Noir dans les hautes terres du nord (plus de 1 000 mg/l/an). Ces provinces sont soumises à des pluies de forte intensité, présentent un relief accidenté et subissent une déforestation importante.

Industries minières. Le Viet Nam est riche en minéraux de base et en minéraux précieux, et dispose aussi d'importants gisements de charbon. L'exploitation du charbon est essentiellement concentrée dans la province côtière de Quang Ninh bordant la frontière avec la Chine et, à un moindre degré, dans la province de Thai Nguyen. L'industrie du charbon expulse chaque année 1,5 million de tonnes de terre et de pierre sans compter des tonnes de poussières dans l'air. Les sources principales de pollution de l'eau par l'exploitation du charbon sont le lessivage des matériaux d'extraction et le lavage du charbon.

De nombreuses mines d'or, de plomb et de zinc à ciel ouvert sont exploitées de façon incontrôlée et seraient à l'origine d'un taux élevé en arsenic, en cyanure et autres métaux lourds. Des concentrations de 2 mg/l d'arsenic ont été enregistrées dans plusieurs provinces du Viet Nam, or la concentration maximale admissible est de 0.01 mg/l d'après l'OMS. Il existe une forte corrélation entre les concentrations en arsenic et différentes formes de cancer.

Engrais et insecticides. La contamination des eaux par les engrais et les insecticides semble être limitée du fait d'une relativement faible utilisation de ces intrants agricoles. Bien que des cas de pollution par les nitrates²¹ aient été relevés, ils restent encore très localisés (Banque Mondiale, 1995). Les études menées par le Ministère de la Santé sur l'impact des insecticides au Viet Nam se sont révélées contradictoires. En première étude réalisée en 1990 sur les résidus de récoltes ne trouva que des concentrations faibles en dessous des seuils permis. Une seconde étude dans le Delta du Mékong identifia par contre des concentrations au-dessus des seuils permis par l'OMS pour l'eau de boisson. La Banque Mondiale dans son étude sectorielle sur l'environnement conclua, en gardant une certaine réserve, que les insecticides ne représentaient pas encore un problème majeur de pollution des eaux au Viet Nam.

21 La pollution des eaux souterraines par la percolation des nitrates provenant des engrais lessivés et des matières fécales humaines et animales est en passe de devenir une source majeure de pollution des eaux en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord ainsi que dans certains pays en développement comme l'Inde ou le Brésil. Des concentrations en nitrates élevées dans les eaux de boisson peuvent entraîner une substitution du fer de l'hémoglobine par les nitrates et diminuer la capacité de transport de l'oxygène du sang. Le phénomène d'asphyxie qui en résulte (méthanoglobinémie) peut menacer la santé des nourrissons (maladie des bébés bleus).

Annexe IX : Calcul des besoins en eau des périmètres rizicoles de Thai Nguyen

Le calcul des besoins en eau du riz immergé est différent de celui des cultures de plein champ. L'irrigation est non seulement nécessaire pour couvrir les pertes par évaporation mais aussi pour compenser les pertes par percolation dans les champs maintenus presque continuellement inondés. En outre, avant le repiquage, une irrigation substantielle est requise pour la préparation du sol et des pépinières. L'équation empirique suivante est utilisée pour estimer les besoins en eau des périmètres rizicoles à Thai Nguyen (Miloradov et Marjanovic, 1998) :

$$Q = Q_{ir} \frac{S}{K_s + K_a}$$

Où :

- S = Superficie totale irrigable (ha).
- K_s = Coefficient d'efficacité du système d'irrigation utilisé.
- K_a = Coefficient de perte d'eau dans le réseau d'irrigation.
- Q_{ir} = Besoin en eau spécifique exprimée en m³/an/ha.

Les besoins en eau spécifiques des périmètres irrigués rizicoles de Thai Nguyen ont été calculés à l'aide du logiciel CROPWAT développé par la FAO pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation (version 7.0 de novembre 1995). Ce logiciel est bâti sur l'équation de Penman-Monteith pour le calcul de l'évapotranspiration (ET₀) et la méthode de l'USDA-SCS pour le calcul des pluies efficaces. L'équation de Penman-Monteith peut être exprimé, comme suit :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Où :

- ET₀ = Evapotranspiration de référence [mm jour⁻¹].
- R_n = Radiation nette à la surface de la culture [MJ m⁻² jour⁻¹].
- G = Densité des flux de chaleur du sol [MJ m⁻² jour⁻¹].
- T = Température de l'air à 2 m de hauteur [°C].
- u₂ = Vitesse du vent à 2 m de hauteur [m s⁻¹].
- e_s = Humidité équivalente à la pression de saturation [kPa].
- e_a = Humidité réelle [kPa].
- e_s-e_a = Déficit par rapport à l'humidité équivalente [kPa].
- Δ = Courbe humidité pression [kPa °C⁻¹].
- γ = Constante psychrométrique [kPa °C⁻¹].

Sur la base de travaux menés par le PNUD dans le delta du Fleuve Rouge et par le GRET dans le district de Tam Dao (versant du Tam Dao situé dans la province de Phu Tho), nous avons retenu les hypothèses suivantes pour le calcul des besoins en eau à la parcelle :

- deux cultures de riz par an sur chaque parcelle (un riz de printemps de janvier à mai et un riz de mousson de juin à septembre). Ces deux cultures peuvent dans certains cas être suivies par une culture de maïs ou de patates douces d'hiver aux besoins en eau limités par rapport à ceux du riz ;
- les pépinières couvrent 10% de la superficie finale transplantée ;
- la période de pépinières est de 40 jours et la durée végétative totale est de 150 jours ;

- un maximum de 150 mm d'eau est nécessaire pour la préparation du sol pour le riz de printemps et de 50 mm d'eau pour celle du riz de mousson ;
- la période de préparation du sol est de 30 jours ;
- le taux de percolation maximum est de 2.5 mm/jour.

Seule la station météorologique de Thai Nguyen dispose des données nécessaires pour le calcul de l'évapotranspiration selon l'équation de Penman-Monteith. Les valeurs obtenues pour la station météorologique de Thai Nguyen ont été extrapolées à l'ensemble de la province de Thai Nguyen. Sur la base des données de la station de Thai Nguyen, les besoins moyens en eau pour la culture du riz d'hiver/printemps sont estimés à 480,3 mm et ceux du riz de mousson à 258,5 mm dans la province de Thai Nguyen. En assumant des besoins en eau d'irrigation négligeables pour la troisième culture non rizicole d'automne, ces résultats nous donnent une demande en eau totale de 738,8 mm par hectare et par an. Les tableaux 78 et 79 reproduisent le détail des calculs des besoins en eau.

Il est malaisé de calculer l'efficacité de l'irrigation au Viet Nam. Elle peut varier du simple au triple pour un même site en fonction du prix de l'eau et du mode de gestion des périmètres irrigués. Ainsi, Luong Xuan Chinh (1999) a montré que la consommation d'eau pour la culture du printemps pouvait varier de 3 175 m³/ha à 9 774 m³/ha pour des périmètres similaires dans le district de Nam Thanh dans le delta du Fleuve rouge. Les périmètres les plus économes en eau étant directement gérés par les villageois alors que les consommations les plus importantes étaient atteintes pour les périmètres alimentés en eau par la Compagnie nationale hydraulique.

En prenant pour hypothèse que la plus grande partie des pertes latérales des parcelles les plus élevées contribuent à l'alimentation en eau des parcelles les plus basses, nous avons estimé l'efficacité moyenne de l'irrigation à 70% à Thai Nguyen. Ceci nous donne une consommation totale de 10 550 m³/ha/an dans la province de Thai Nguyen. Considérant que les 2/3 des pertes en eau dans les canaux d'irrigation retournent immédiatement au système hydrologique, nous retiendrons pour le calcul de la pression sur les ressources en eau le chiffre de 8 440 m³/an/ha pour les prélèvements agricoles.

Tableau 78 - Calcul de l'ETP pour le riz d'hiver/printemps

RICE EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION REQUIREMENTS											
Rain climate station: Thai Nguyen						Crop: Rice					
ETO climate station: Thai Nguyen						Transplanting date: 1 February					
Month	Dec	Stage	Area %	Coef Kc	Etcrop mm/day	Perc mm/day	Lprep mm/day	RiceRq mm/day	EffR mm/dec	IrReq mm/day	IrReq mm/dec
Dec	3	Nurs	10	1.20	0.22	0.3	1.4	1.8	0.4	1.77	15.9
Jan	1	Nu/La	23	1.17	0.49	0.6	4.2	5.3	1.7	5.10	51.0
Jan	2	Land	52	1.11	1.01	1.3	4.5	6.8	4.4	6.37	63.7
Jan	3	Land	84	1.04	1.59	2.1	4.5	8.2	9.5	7.40	81.4
Feb	1	Init	100	1.00	1.91	2.5	-	4.4	12.2	3.19	31.9
Feb	2	Init	100	1.00	1.99	2.5	-	4.5	14.0	3.09	30.9
Feb	3	In/De	100	1.01	2.07	2.5	-	4.6	12.5	2.62	21.0
Mar	1	Deve	100	1.02	2.18	2.5	-	4.7	16.7	3.00	30.0
Mar	2	Deve	100	1.04	2.28	2.5	-	4.8	18.1	2.97	29.7
Mar	3	De/Mi	100	1.05	2.60	2.5	-	5.1	24.2	3.10	34.1
Apr	1	Mid	100	1.05	2.89	2.5	-	5.4	25.1	2.88	28.8
Apr	2	Mid	100	1.05	3.18	2.5	-	5.7	28.2	2.86	28.6
Apr	3	Mid	100	1.05	3.51	2.5	-	6.0	36.1	2.40	24.0
May	1	Mi/Lt	100	0.99	3.63	1.9	-	5.6	46.4	0.92	9.2
May	2	Late	100	0.87	3.46	1.0	-	4.5	54.7	0.00	0.0
Total					330	296	149	775	304	480.3	

CROPWAT 7.0

31/07/99

Tableau 79 - Calcul de l'ETP pour le riz de mousson

RICE EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION REQUIREMENTS											
Rain climate station: Thai Nguyen						Crop: Rice					
ETO climate station: Thai Nguyen						Transplanting date: 1 July					
Month	Dec	Stage	Area %	Coef Kc	Etcrop mm/day	Perc mm/day	Lprep mm/day	RiceRq mm/day	EffR mm/dec	IrReq mm/day	IrReq mm/dec
Dec	3	Nu/La	10	1.20	0.49	0.3	0.5	1.2	6.0	0.75	8.2
Jan	1	Land	25	1.17	1.23	0.6	1.5	3.4	13.2	2.04	20.4
Jan	2	Land	55	1.10	2.64	1.4	1.5	5.5	29.4	2.58	25.8
Jan	3	La/In	85	1.03	3.91	2.1	1.5	7.5	46.1	2.92	29.2
Feb	1	Init	100	1.00	4.52	2.5	-	7.0	55.6	1.46	14.6
Feb	2	In/De	100	1.00	4.60	2.5	-	7.1	56.7	1.43	14.3
Feb	3	Deve	100	1.01	4.48	2.5	-	7.0	60.1	2.01	22.1
Mar	1	Deve	100	1.03	4.39	2.5	-	6.9	52.0	1.70	17.0
Mar	2	De/Mi	100	1.04	4.30	2.5	-	6.8	50.1	1.78	17.8
Mar	3	Mid	100	1.05	4.33	2.5	-	6.8	54.9	2.29	25.2
Apr	1	Mid	100	1.05	4.40	2.5	-	6.9	51.1	1.79	17.9
Apr	2	Mid	100	1.05	4.44	2.5	-	6.9	51.4	1.80	18.0
Apr	3	Mi/Lt	100	1.04	3.96	2.4	-	6.3	45.7	1.77	17.7
May	1	Late	100	0.96	3.25	1.7	-	4.9	39.2	1.02	10.2
May	2	Late	100	0.84	2.51	0.7	-	3.2	27.2	0.00	0.0
Total					539	295	50	885	639	258.5	

CROPWAT 7.0

TRAVAUX CITÉS

Asian Development Bank (1998)., *The Bank's Policy on Water - Working Paper, Manila, The Philippines.*

Asian Development Bank (1998). *Summary of Findings : TA N°5800-REG, Measuring Environmental Performance in Asia- National Workshops in Shanghai, Manila and Dakha, Manila, The Philippines.*

Asia Forest Network (1998). *Stewards of Viet Nam's Upland Forests, Center for Southeast Asia Studies, University of California, Berkeley, USA* (document disponible à www.mekonginfo.org .

Bakkes J.A., van den Born G.J., Helder J.C. and Swart R.J, Hope C.W. and Parker J.D.E. (1994). *An Overview of Environmental Indicators: State of the art and perspectives*, UNEP, Nairobi, Kenya.

Blomac (de) F., Gal R., Hubert M., Richard D., Turret C. (1994). *ARC/INFO- Concept et applications en géomatique*, Editions Hermès, Paris, France.

Bonn F., Rochon G. (1992). *Précis de télédétection- Vol.1: Principes et Méthodes*. Presse de l'Université du Québec, Canada.

Bouix T. (1988). *Conception d'un indice de fragilité des forêts pour la gestion de l'environnement dans les hautes terres du Viet Nam*. Mémoire de stage - DEA Environnement, Temps, Espaces, Sociétés, Université d'Orléans, France.

Brabant P, Darracq S. (1999). *Rapport explicatif. Province de Thai Nguyen*. Projet STD3 –CT94-0310, Hanoi, 1999.

Brabant P, Darracq S. (1999). *Constitution et utilisation d'une base de données géographique pour une meilleure gestion des terres et de l'environnement. Application aux hautes-terres du Vietnam*. Rapport synthétique final. Projet STD3 –CT94-0310, Hanoi, 1999.

Brabant P, J.C. Castella, S. Darracq, Y. Glemarec, Le Duc An, Nguyen Tran Cau et V. Simonneaux (1997). *Une base de données géographique provinciale pour la gestion concertée des ressources naturelles dans les hautes-terres du Vietnam*. Communication pour le Sommet de la Francophonie, Viet Nam, Octobre 1997.

Brabant P. (1997). *Rapport d'activités programme STD3 - CT94-0310 : 1/01-30/06/97*. Communication personnelle.

Brabant P. (1997). *Méthode d'évaluation de l'état de dégradation des terres* (révisé le 20 Octobre 1997). Document interne, IRD, Paris, France.

Brabant P., Darracq S., Egué K., Simmoneaux V. (1996). *Etat de dégradation des sols au Togo*. IRD (ex ORSTOM), Paris, France.

Brard J.P. (1995). *Inventaire des réflexions relatives à l'introduction des coûts environnementaux en comptabilité nationale en France et à l'étranger*. Assemblée Nationale, Paris, France.

Centre for Population and Human Resources Studies (1993). *State of the Art Report on Spontaneous Migration in Viet Nam*, Hanoi, Viet Nam.

Centre for Environment Research, Education and Development (1994). *Report on Environmental Surveys od Seven Provinces/Cities of Viet Nam*, Hanoi, Viet Nam.

Centre national de Formation aux métiers de l'eau et de l'environnement (1999). *Protection et exploitation des ressources de la rivière CAU*, Hanoi, Viet Nam.

Cheatle E. Marion (1995). *Indicators for Sustainable Development: UNEP's Role in a Collaborative Efforts, Industry and Environment*, Vol.18, No 2-3, UNEP, Nairobi, Kenya.

Chomitz K., Gray D.. (1995), *Roads, lands, markets, and deforestation- A Spatial Model of Land Use in Belize*, World Bank, Policy Research Working Paper 1444, Washington D.C., USA.

Conseil économique et social des Nations Unies (1991). *Quelques approches de la comptabilité de l'environnement*. Nations Unies, Genève, Suisse.

DANIDA/Carl Bro International/CERPAD (1997). *National Rural Water Supply & Sanitation Strategy Study - Thai Nguyen, Province Repor.*, DANIDA, Hanoi, Viet Nam.

DANIDA/Carl Bro International/CERPAD (1997). *National Rural Water Supply & Sanitation Strategy Study - 9 Provinces Survey Report (Draft)*, DANIDA, Hanoi, Viet Nam.

Darracq S., Brabant P. et Glémarec Y. (1998). *Evaluation et gestion des terres au Vietnam : une base de données géographique pour les utilisateurs*. Actes du Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier (France), 21-26 août 1998 ; 10 p.

Darracq S., Brabant P., Le Duc An et Nguyen Tran Cau (1997). *A provincial database for integrated management of natural resources in the vietnamese highlands*. Proceedings of the Geo-Informatics Conference of the International Eurasian Academy of Science and the fourth International Workshop on geographical Information System, Beijing '97.

Dégremont (1989). *Mémento technique de l'Eau*. Lavoisier -Technique et Documentation, Paris, France.

DOSTE de Thai Nguyen (1998). *Rapport sur l'environnement dans la province de Thai Nguyen* (original en vietnamien). Thai Nguyen, Viet Nam.

Dumanski J., S. Gameda, C. Pieri (1998). *Indicators of Land Quality and Sustainable Land Management –An annotated Bibliography*. The World Bank, Washington D.C., USA.

Dumont René (1935). *La culture du riz dans le delta du Tonkin*. Réédition de 1995, Prince of Songkla University, Thaïlande.

Eimberck M., Jamagne M. (1985). *Compte-rendu de mission au Viet nam*. INRA Versailles, France.

Eimberck M., Hardy M., Jamagne M. (1987). *Les sols dégradés du bassin du Fleuve Rouge – Premiers résultats*. INRA, France.

Forestry Service of Bac Thai (1995). *Social Forestry Development Project in Bac Thai Province*. Thai Nguyen, Viet Nam.

Fournier F. (1972)*. *Conservation des sols*. Conseil de l'Europe, Strasbourg. (1972).

FAO (1992), *CROPWAT, Un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation*. Bulletin d'Irrigation et de drainage 46, Rome, Italie.

FAO (1993)*. *Guidelines for Land-Use Planning*, FAO Development Series 1, FAO, Rome.

FAO (1995). *Planning for Sustainable use of land resources*. FAO Land and Water Bulletin, FAO, Rome, Italy.

FAO (1996). *Forest Sector and Watershed Management Project. Annexe 6: Land Allocation, Land Use Planning and Watershed Monitoring*, Hanoi, Viet Nam.

- FAO (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56*, Rome, Italy.
- Groupe de Recherche et d'Echange Technologiques (1995). *Environnement et développement durable en bordure des zones sensibles ou protégées du Nord Viêt-Nam*, GRET, Paris, France.
- Hammond A., Adriaanse A., Rodenburg E., Bryant D., Woodward R. (1995). *Environmental Indicators: A systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*, World Resource Institute, USA.
- Harribey J.M. (1998). *Le développement soutenable*. Economica, Paris, France.
- Havard University- Environmental System Program (1996). *Environmental Indicators (DRAFT)*, USA.
- Inhaber H.(1976). *Environmental Indices*, Toronto: John Wiley & Sons.
- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (1986). *Les Comptes du patrimoine naturel*. INSEE, Paris, France.
- Institut National des Sciences Agronomiques/Le GRET-Programme Fleuve (1999). *Agriculture familiale et Gestion des ressources du milieu dans le bassin du Fleuve Rouge*. Actes du Séminaire, Hanoi, 9-12 avril 1996. Maison d'Édition de l'Agriculture, Paris, France.
- International Soil Conservation Organisation (1996). *Precious Earth*, ISCO, Wageningen, Pays-Bas.
- International Union for Conservation of Nature (1995). *Assessing Progress Towards Sustainability- The IUCN/IDRC Project on Monitoring and Assessing Progress Towards Sustainability: Approaches, Methods, Tools, Progress*. IUCN, Gand, Switzerland.
- Jouvenel (de) B. (1966). *Proposition à la Commission des Comptes de la Nation.*, Commission des Comptes de la Nation, Paris, France.
- Jain R., Urban L., Stacey G., Balbach H.(1993). *Environmental Assessment*, McGraw-Hill, USA.
- Korte G. (1994). *GIS Book*. OnWord Press, USA
- Kumar R., Manning E., Murck B. (1993). *The Challenge of Sustainability, Center for a Sustainable Future, Fondation for International Training, Don Mills, Canada*.
- Lê Bà Thảo (1999). *Viet Nam, Pays et régions géographiques*. Editions Thê Gioi, Hanoi, Viet Nam.
- Le Dossier (1987). *Les Comptes du patrimoine naturel: Un enjeu pour l'environnement*. Le Dossier, No 98, INSEE, France.
- Luong Xuan Chinh (1999). *Quantité d'eau consommée pour une unité de surface à l'amont du système*, en cours de publication, GRET, Hanoi, Viet Nam.
- Lutz E. (1993). *Towards Improved Accounting for the Environment*, UNSTAT-World bank Symposium, World bank, Washington, D.C., USA.
- Lustig T., Glemarec Y., Solomatine N., Silver M. and Aamodt T. (1994). *Strategy and Action Plan for Mitigating Water Disasters in Viet Nam*, Min. Water Resources. UNDP, DHA, Hanoi, Viet Nam.
- McCloy K. (1995). *Resource Management Information Systems*. Taylor & Francis Inc., USA
- McRae M. (1999), Tam Dao. *Viet Nam's sanctuary under siege*, vol.195, n°6, National Geographic, Washington D.C., USA.

Miloradov M., Marjanovic P. (1998). *Guidelines for conducting Water Resources Assessment. Studies and reports in hydrology*, UNESCO, Paris, France.

Ministry of Forestry (1988). *SVR Tropical Forestry and Action Plan, Protection Forests, Towards 2000*, Min. of Forestry, Hanoi, Viet Nam.

Ministère de la Coopération et du Développement (1991). *Mémento de l'Agronome*. Collection "Techniques rurales en Afrique", Min.de la Coopération et du Développement, Paris, France.

Ministry of Agriculture and Rural Development (Viet Nam)/Danida (Denmark) (1999). *Institutional Assessment Study, Preparation of Sector Program Support, Sustainable Use of Freshwater Resources in Viet Nam*, Viet Nam.

Moeremans B., Dautrebande S. (1998). *Rapport d'activité 1/1/98 – 30/6/98*. Projet STD3 CT94-0310 Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique.

Morrison Elaine and Dubois Olivier (1998). *Sustainable Livelihoods in upland Vietnam: Land allocation and beyond*. *Forestry and Land Use Series No. 14*, International Institute for Environment and Development, Canada.

MOSTE/UNDP (1995). *Red River Delta Master Plan, Background Report 4, Water Resources Planning*, Hanoi, Viet Nam.

MOSTE/UNDP (1995). *Red River Delta Master Plan, Background Report 1, Hydrology and Meteorology*, Hanoi, Viet Nam.

MOSTE/UNDP (1995). *Red River Delta Master Plan, Background Report 28, Public Health*, Hanoi, Viet Nam.

MOSTE/UNDP (1995). *Red River Delta Master Plan, Background Report 27, Environmental Survey*, Hanoi, Viet Nam.

MPI/UNDP (1997), Viet Nam Capacity 21 Project. *Planning Tools for Environmental Assessment of Economic Development Policies and Programmes*, Hanoi, Viet Nam. (table p19, development of forests from 1976-1995).

MPI/UNDP (1997), Viet Nam Capacity 21 Project. *Incorporating Environmental Considerations Into Sector Development Planning*, Hanoi, Viet Nam.

UNDP (1995 et années suivantes). *Industrial Pollution Control in Viet Tri*. Document de projet et rapports de projets, Hanoi, Viet Nam.

UNDP/UNICEF (1996). *Catching up – Capacity development for poverty elimination in Viet Nam*, Hanoi, Viet Nam.

UNICEF, National Institute of Nutrition, Institute of Malariology, Parasitology, Entomology and Tropical Diseases, Center for Disease Control and Prevention (CDC,USA), Program against Micronutrient Malnutrition (PAMM, USA) (1995). *Report of the National Anemia and Nutrition Risk Factor Survey*, Hanoi, Viet Nam.

Organization for Economic Cooperation and Development (1994). *Environmental Indicators*. OECD, Paris, France.

Ott, W. (1978). *Environmental Indices, Theory and Practices*. Ann. Arbor Science Publishers, Inc. USA.

Pieri C., Dumanski J., Hamblin A., and Young A. (1995). *Land Quality Indicators: A discussion Paper (third draft)*, World Bank, FAO, UNDP, UNEP, Washington D.C., USA.

- Roose E. (1996). *Land Husbandry: Components and Strategy*, FAO Soil Bulletin 70, FAO, Rome.
- Reid W., McNeely J., Tunstall D., Bryant D., Winograd M. (1993). *Biodiversity Indicators for Policy-Makers*. WRI/IUCN/UNEP Global Biodiversity Strategy, World Resource Institute, USA.
- Service de la Science, de la technologie et de l'environnement de Bac Thai (1994). *Observation sur l'état actuel du milieu, Thai Nguyen, Vietnam* (original en vietnamien).
- Sfez L. (1992). *Critique de la Décision*. Presse de la Fondation nationale des Sciences politiques, Paris, France.
- Silver M., Glemarec Y. (1992). *Overview of Flood Mitigation, Emergency Preparedness, and Flood Disaster Management in Viet Nam*. Min. of Water Resources, UNDP, Hanoi, Viet Nam.
- Silver M. (1999). *Rehabilitation of Rural Reservoirs-Minutes of a field survey in Thai Nguyen- UNDP internal document*, Hanoi, Viet Nam.
- Soltner D. (1988). *Les bases de la production végétale. Tomes 1&2*, Sciences et Techniques Agricoles, Angers, France.
- Statistical Division of the United Nations (1993). *Handbook of National Accounting: Integrated Environmental and Economic Accounting*. United Nations, New York, USA.
- Swart R.J, Bakkes J.A, Niessen L.W., Rotmans J., de Vries H.J.M. and Weterings R. (1995). *Scanning the Global Environment: A framework and methodology for integrated environmental reporting and assessment*, UNEP/EAP.TR/95-01, Nairobi, Kenya.
- Teerink J. R. and Nakashima Masahiro (1992). *Water Allocation, Rights, and Pricing-Examples from Japan and the United State*, World Bank Technical Paper Number 198, The World Bank, Washington, D.C., USA.
- The Economist (19 déc. 1998). *Sui genocide*. The Economist Newspaper Limited, UK.
- Thomas F. (1999). *Histoire du régime et des services forestiers français en Indochine de 1862 à 1945*, Editions The Gioi, Hanoi, Viet Nam.
- United Nations (1992). *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development*, United Nations, New York, USA.
- United Nations-Commission on Sustainable Development (1996). *Indicators of Sustainable Development, Framework and Methodologies*. United Nations, New York, USA.
- United Nations (1997). *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*. United Nations, New York, USA.
- UNEP-Environmental Assessment Programme for Asia and the Pacific (1995a). *Land Cover Assessment and Monitoring-Viet Nam*. Bangkok, Thailand.
- UNEP-Environmental Assessment Programme for Asia and the Pacific (1995b). *State of Environment-Methodology*. Bangkok, Thailand.
- UNEP (1995c). *Report of the Workshop on Indicators of Sustainable Development for Decision-making*. UNEP/EAP.MR/95-1, Nairobi, Kenya.
- UNEP (1996). *Guide to Information Management in the Context of the Convention on Biological Diversity*, Nairobi, Kenya.

UNEP, ISSS-AISS-IBG, ISRIC, FAO (1995). *Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER)- Procedures Manual (revised edition)*, ISRIC, Wageningen, Hollande.

UNEP, ICRIC (1995), SWEAP. *A computer program for water érosion assessment applied to SOTER, version 1.5*. ISRIC, Wageningen, Hollande.

UNDP (1990 and following years). *Human Development Report*. UNDP, New York, USA.

UNDP (1997). *Synergies in national implementation-the Rio agreements*. UNDP, New York, USA.

UNDP, UNEP, FAO (1994). *Land Degradation in South Asia: Its Severity, Causes and Effects Upon The People*, FAO, Rome, Italy and UNDP, New York, USA.

UNIDO/Safége (1994). *Water Supply and Sanitation in Thai Nguyen*. UNIDO, Hanoi, Viet Nam.

Veyret Y., Pech P. (1993). *L'homme et l'environnement*. Presses Universitaires de France, Paris, France.

Wilson E. O. (1988). *Biodiversity*. National Academy Press, Washington, D.C., USA.

World Bank (1992). *China Environmental Strategy Paper*. Washington D.C., USA.

World Bank (1994). *Social Indicators of Development*. Washington D.C., USA.

World Bank (1995a). *Viet Nam: Environmental Program and Policy Priorities for a Socialist Economy in Transition*. Washington D.C., USA.

World Bank, Asian Development Bank, FAO, UNDP (1996). *Viet Nam Water Resources Sector Review*, Washington D.C., USA.

World Business Council for Sustainable Development (1997). *Exploring Sustainable Development*. London, UK.

World Resource Institute (1986). *Fresh Water*. Oxford University Press. New York, USA.

Zoller Henry G., Beguin Hubert (1992). *Aide à la décision - L'évaluation des projets d'aménagement*. Publication Economica, Paris, France.

RÉSUMÉ

INDICATEURS D'ENVIRONNEMENT EN ZONE TROPICALE

Application à la dégradation des forêts, des eaux et des sols dans la province de Thai Nguyen au Viet Nam

Dans le cadre d'une action de recherche coordonnée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, anciennement ORSTOM), la réalisation d'une base de données géographique (SIG) a été entreprise pour aider au développement durable de trois provinces pilotes situées dans les zones de collines et de montagnes du Vietnam. La présente recherche a pour objet de définir des indicateurs d'environnement afin de faciliter l'analyse et la communication aux décideurs locaux des informations disponibles au sein du SIG. Cette étude décrit les méthodologies mises en œuvre pour élaborer des indicateurs : (i) de dégradation des forêts et de perte de biodiversité ; (ii) d'érosion des sols ; (iii) de pénurie en eau ; et (iv) de pollution de l'eau. En accord avec le cadre conceptuel STRESS, des indicateurs de pression, d'état et de réponse ont été développés pour chacune de ces quatre composantes fondamentales de l'environnement des hautes terres tropicales.

L'étude de cas de la province pilote de Thai Nguyen confirme l'intérêt des indicateurs d'environnement comme instruments de traitement de l'information pour sensibiliser des décideurs à la fragilité et aux contraintes de développement d'un écosystème trop souvent perçu comme riche et sous-exploité. Ils permettent d'analyser, de hiérarchiser et de synthétiser de larges quantités de données biologiques, physiques et socio-économiques en quelques cartes et chiffres directement pertinents pour la prise de décision. Cette étude de cas met aussi en évidence l'importance d'une banque de données fiable pour le développement durable des hautes terres tropicales. De nombreux pays en voie de développement souffrent de l'absence de mesures de terrain de qualité, et des restrictions diverses limitent communément l'accès à ces données. Prenant avantage des nombreuses fonctions d'analyse et de communication des SIG, cette étude propose une approche pour développer des indicateurs d'environnement pour les hautes terres tropicales à partir de données officielles et accessibles au public.

RÉSUMÉ DE LA VERSION ANGLAISE

ENVIRONMENTAL INDICATORS FOR TROPICAL AREAS

A methodology applied to forest, water and soil degradation in Thai Nguyen Province in Viet Nam

Within the framework of research on sustainable management of tropical uplands coordinated by the French Institute for Development Research (IRD, formerly ORSTOM), the establishment of a Geographical Information System (GIS) has been undertaken for three pilot provinces situated in tropical upland hills and mountains areas of Vietnam. The objective of the present research is to define environment indicators to facilitate the analysis and communication to local decision-makers of the information generated by this GIS information. The document describes the methodologies developed to define environmental indicators of : (i) forest degradation ; (ii) soil erosion ; (iii) water shortage ; and (iv) water pollution. Using the STRESS model, environmental indicators of pressure, state and response have been developed for each of these fundamental conditions of tropical uplands.

The case study of Thai Nguyen province confirms the usefulness of environmental indicators as information instruments to raise the awareness of decision-makers about the fragility of an eco-system too often wrongly perceived as rich and under-exploited. Environmental indicators facilitate the analysis and conversion of large amounts of biological, physical and socio-economic data into only a few maps and figures directly relevant for decision-making. The case study of Thai Nguyen Province also highlights the importance of data quality and data availability for sustainable tropical uplands management. In developing countries, complete and reliable field measurements are often lacking, and various restrictions commonly exist preventing full access to even this limited information. Taking advantage of the analysis and communication functions of a GIS, the present document gives an example of how to develop environmental indicators sufficiently strong to support decision-making in a developing country using commonly available published information and data.