

## Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002)

*Erwann Lagabrielle, Pascale Metzger, Cécile Martignac, Bernard Lortic,  
Laurent Durieux*

*Cirad, Université de la Réunion, IRD*

**Résumé.**— La Réunion (océan Indien) est un espace insulaire en essor socio-économique rapide. La composante spatiale observable de ces mutations a été cartographiée par télédétection à partir d'images Spot sur la période 1989-2002. La méthode de détection des changements mise en œuvre est une comparaison de classifications (maximum de vraisemblance et analyse structurale). Les résultats obtenus confirment une forte croissance des espaces urbains, une migration spatiale des activités agricoles en altitude ainsi que de nettes disparités intrarégionales en termes d'évolution. L'analyse révèle également des dynamiques plus marquées sur les mi-pentes et les Hauts de l'île, et de façon surprenante dans l'enceinte actuelle du Parc national. Ces résultats remettent partiellement en cause des postulats d'aménagement à la Réunion, en particulier l'idée d'une ville s'étendant exclusivement sur les espaces agricoles.

**Mutations socio-économiques • La Réunion • Télédétection**

**Abstract.**— **Abstract.- Land use trends on Reunion Island (1989-2002).**— Reunion Island in the Indian Ocean is experiencing rapid socio-economic change. The spatial component of this change was mapped using Spot images between 1989 and 2002. The change detection method used is a comparison of classifications (maximum likelihood and structural analysis). The results confirm a rapid increase in urban spread, a spatial migration of agricultural activities from lowland to upland areas and sharp disparities between micro-regions. The analysis also reveals more pronounced trends in midland and upland areas and, surprisingly, inside the current boundaries of the National Park. These results challenge some regional development assumptions on Reunion Island, particularly the idea that urbanisation is spreading exclusively into agricultural areas.

**Remote sensing • Réunion Island • Socio-economic change**

**Resumen.**— **Las dinámicas de la ocupacion del suelo en La Reunión (1989-2002).**— La isla de La Reunión (Oceano indico) presenta un desarrollo socio-económico rápido desde dos decenios. La componente espacial de estas mutaciones ha sido mapeada por control remoto con imágenes Spot entre 1989 y 2002. El método de detección de los cambios es una comparación de clasificaciones (maximum de verosimilitud y análisis estructural). Los resultados confirman un crecimiento fuerte de los espacios urbanos, una migración espacial de las actividades agrícolas hacia las alturas, así que nítidas disparidades de evolución intra-regionales. El análisis revela también dinámicas mas marcadas en las partes medianas de las pendientes y en los Altos (Hauts) de la isla, y, de manera sorprendente, en el perímetro actual del Parque Nacional. Estos resultados critican parcialmente unos postulados del ordenamiento de la isla, en particular la idea de una ciudad progresando únicamente sobre los espacios agrícolas.

**Control remoto • La Reunión • Mutaciones socio-económicas**

## 1. Introduction

L'île volcanique de la Réunion (2512 km<sup>2</sup>), située dans l'océan Indien, est unanimement considérée comme un espace insulaire en mutation socio-économique (Benjamin, Godard, 1999). La traduction spatiale de ces mutations est étudiée depuis plus d'un demi-siècle (Defos Du Rau, 1960 ; Cadet, 1980) ; on peut voir aussi ce qu'en écrivait George Sand au XIX<sup>e</sup> siècle (Sand, 1863). L'accélération des dynamiques spatiales à la Réunion est liée à un essor socio-économique rapide, consécutif à la départementalisation du territoire en 1946 (Chatelain, 1993) et plus récemment, à partir des années 1990, aux nombreuses aides européennes dont a bénéficié cette région ultrapériphérique de l'Union européenne. La croissance des espaces urbains, notamment sur le littoral et les mi-pentes de l'île, figure au premier rang des préoccupations d'aménagement dans ce petit espace insulaire (Jauze, Ninon, 2006 ; Lajoie, Actif, 2001). Cette croissance urbaine, qui se caractérise par des densités très faibles — G. Lajoie et N. Actif parlent de villes-jardins — est également le fruit d'une dynamique démographique spectaculaire : le taux annuel de croissance de la population est environ trois fois supérieur à celui de la métropole. Il y a actuellement 776 000 habitants sur l'île (estimation INSEE 2005) et les projections prédisent 1 million d'habitants en 2030. En même temps, les options spatiales pour l'agriculture se sont réduites (Martignac, Pariente, 2002) et la protection des milieux naturels rendue plus difficile (Strasberg *et al.*, 2005), alors que s'accroît la compétition pour l'accès à la ressource foncière. La compréhension et le suivi des dynamiques d'occupation du sol, ainsi que la représentation des changements qui affectent le territoire, constituent donc des enjeux politiques, économiques et sociaux majeurs à la Réunion.

Pour décrire les changements territoriaux qui accompagnent l'augmentation de la population, la croissance et la tertiarisation de l'économie, on a tendance à opposer les espaces urbains, les espaces agricoles et les espaces naturels. Les représentations des interactions entre ces modes d'occupation du sol sont souvent partielles — par exemple : « la ville consomme uniquement les espaces agricoles » — et tendent à masquer une réalité géographique complexe et plus nuancée. La mise à l'épreuve de ces représentations sociales, souvent acceptées comme des postulats d'aménagement, a constitué la problématique scientifique de cette étude. En particulier les objectifs poursuivis sont : 1) la compréhension des mécanismes du développement urbain sur l'île de la Réunion pour décrypter les processus qui conduisent à la densification des villes et/ou à leur étalement (Metzger, 2005), 2) la mise en relation des dynamiques observables des espaces agricoles avec les stratégies spatiales et foncières des acteurs, en particulier les agriculteurs et propriétaires de terres agricoles (Martignac, 2006) et enfin 3) la mise en relation des dynamiques spatiales avec les enjeux de conservation de la biodiversité. À l'exception des couches d'informations sur le bâti fournies dans la BD Topo IGN de 1997 et 2003, aucune information ne permettait d'établir un diagnostic quantitatif, global et fiable de ces dynamiques. Cette information sur les changements d'occupation du sol était notamment attendue pour accompagner l'élaboration et la révision des documents de planification à portée réglementaire (Schéma d'Aménagement Régional, Schémas de COhérence Territoriale, Plans Locaux d'Urbanisme) et, plus spécifiquement, pour évaluer et ajuster les stratégies de développement territorial relatives à l'agriculture, au développement urbain, à la mise en place du Parc national et au déploiement des infrastructures de transport. La conjonction d'intérêts opérationnels et scientifiques a ainsi contribué à l'élaboration d'un partenariat original entre des scientifiques, des aménageurs et des représentants de filières agricoles dans le cadre du projet TEMOS (Téledétection pour l'Étude des Modes

d'Occupation du Sol). La recherche d'une certaine autonomie régionale de production de l'information géographique à la Réunion a également concouru à la dynamique du projet.

Grâce à leur large couverture spatiale, leur répétitivité élevée et leur faible coût comparativement à des photographies aériennes, les images de télédétection constituent des données privilégiées pour identifier les différences d'état d'une zone en l'observant à des dates différentes (Inglada, 2001). L'utilisation des données satellitaires pour cartographier les changements d'occupation du sol est désormais largement répandue (Girard, Girard, 1999; Chavez, MacKinnon, 1994; Ulbricht, Heckenford, 1998), d'autant plus que l'intervalle temporel maximal est maintenant de deux décennies pour les images Spot, voire plus de trente ans pour les images Landsat. Les principaux facteurs limitant la télédétection des changements sont les différences de conditions atmosphériques, de géométrie d'acquisition et de conditions au sol (Muchoney, Haack, 1994; Song *et al.*, 2001).

Pour cette étude des changements d'occupation du sol à la Réunion, les données satellitaires Spot (1) ont été utilisées. Dans un premier temps, cet article expose les traitements appliqués aux images pour détecter les changements. Les dynamiques spatiales observées sont ensuite analysées globalement, puis par microrégion, par étage altitudinal et en fonction du statut de protection des espaces. La relation entre les dynamiques spatiales observées et les stratégies de développement territorial est alors discutée et mise en perspective.

## 2. Méthode

La méthode est présentée en quatre parties : 1) la préparation des images, 2) le choix de la méthode de détection des changements, 3) la classification des images par maximum de vraisemblance et 4) par analyse structurale.

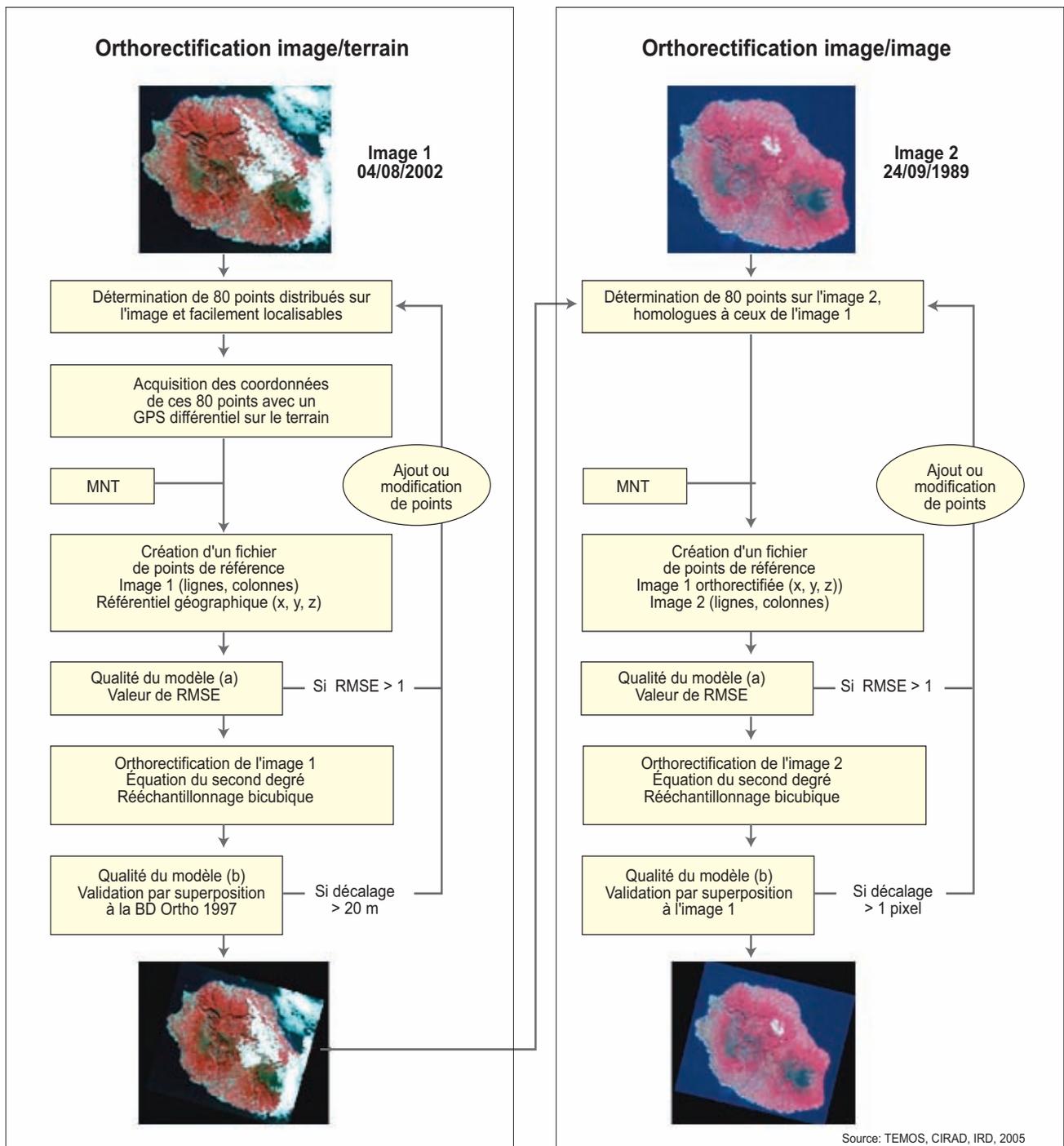
### 2.1 Préparation des images

Pour cartographier les changements d'occupation du sol à la Réunion, nous avons exploité des images Spot 1 et Spot4 (niveau de traitement 1A). Seuls les canaux communs aux deux images (vert, rouge et proche infrarouge) ont été comparés. Les changements ont été analysés sur l'intervalle 1989-2002, la plus ancienne image exploitable de la Réunion datant de 1989 (île entièrement représentée, nébulosité faible) et la plus récente de 2002. Deux images acquises à des dates proches ont été combinées à l'image de 2002 afin de compléter les informations manquantes dans les zones nébuleuses.

La résolution spatiale de l'image de 1989 et de l'image composite de 2002 a été harmonisée à 20 m. L'orthorectification de l'image de 2002 a ensuite été réalisée avec des points relevés sur le terrain à l'aide d'un GPS différentiel (Bappel, 2005) (fig. 1). L'image de 1989 a ensuite été orthorectifiée en référence à l'image Spot de 2002. Cette méthode de géoréférencement « image à image » permet d'optimiser leur superposition. La précision géométrique du décalage entre les deux scènes est finalement inférieure à 1 pixel, minimum requis pour une analyse des changements (Mas, 2000).

### 2.2 Choix de la méthode de détection des changements

Pour détecter les changements, trois grandes options méthodologiques étaient envisageables : la photo-interprétation, l'analyse des comptes numériques des pixels (algèbre d'images, analyse statistique de compositions multidates) ou la comparaison post-classificatoire (Mas, 2000). La photo-interprétation a été d'emblée écartée car, à l'issue d'un long travail de numérisation, elle aurait induit des biais importants liés à des

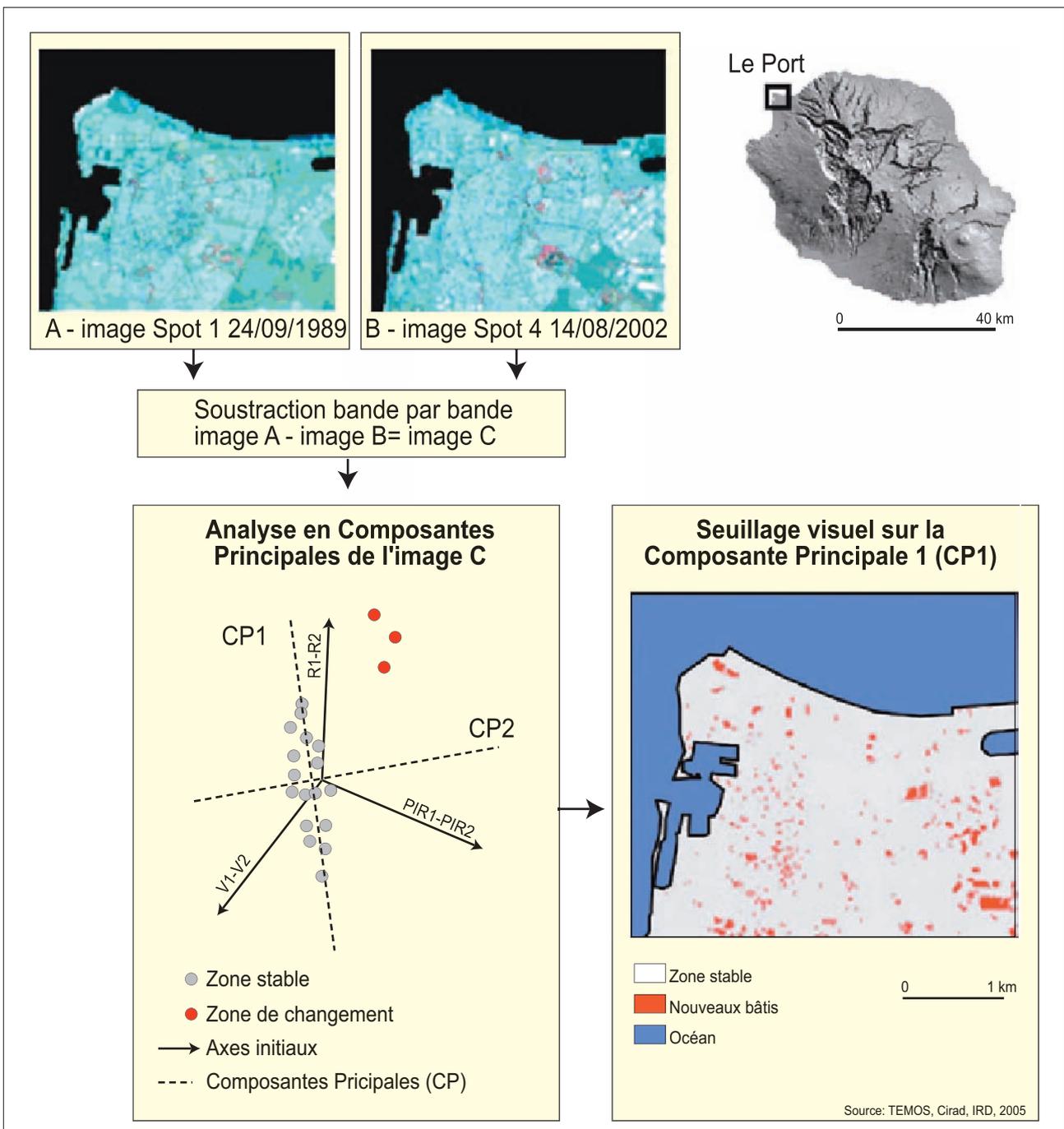


**Figure 1. Procédure d'orthorectification des images.** La RMSE (Root Mean Square Error) est un indicateur standardisé de qualité des correspondances entre les coordonnées des points de référence sur l'image et leurs coordonnées projetées.

divergences d'appréciation par les opérateurs en charge de cette tâche. Une analyse en composantes principales a été conduite sur une soustraction des canaux des deux images (Moisan *et al.*, 1999; Singh et Harrison, 1985) (fig. 2). En dehors d'une détection grossière du phénomène d'urbanisation sur la première composante principale et d'une détection des variations relatives au couvert végétal sur la seconde composante, cette technique s'est révélée inadaptée pour qualifier précisément les changements d'occupation du sol. Néanmoins, cette méthode a permis d'identifier des zones stables aux deux dates qui ont été utilisées par la suite pour déterminer des parcelles d'entraînement dont l'état était identique en 1989 et en 2002. Finalement, compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et

de la diversité des changements d'occupation du sol dont nous escomptions l'observation, c'est la méthode de comparaison post-classificatoire qui a été retenue (Inglada, 2001). Cette méthode consiste à comparer deux classifications effectuées indépendamment sur deux images. L'intérêt de cette approche est la simplicité de sa mise en œuvre. Toutefois, les probabilités de faux changement augmentent avec le nombre de classes (Mas, 2000). Par conséquent, nous avons cherché à réduire *a minima* leur diversité.

Deux méthodes de classifications assistées ont ensuite été combinées pour classer les images : un traitement pixel à pixel classique par maximum de vraisemblance (fig. 3c) et un traitement structural basé sur une analyse du voisinage des pixels (fig. 3d).



**Figure 2. Analyse en composantes principales d'une soustraction canal à canal des images Spot de 1989 (image A) et de 2002 (image B).** Cette méthode a permis d'identifier des zones de permanence (absence de changement) qui ont été utilisées par la suite pour déterminer des parcelles d'entraînement stables aux deux dates. PIR = proche infrarouge, V = vert et R = rouge.

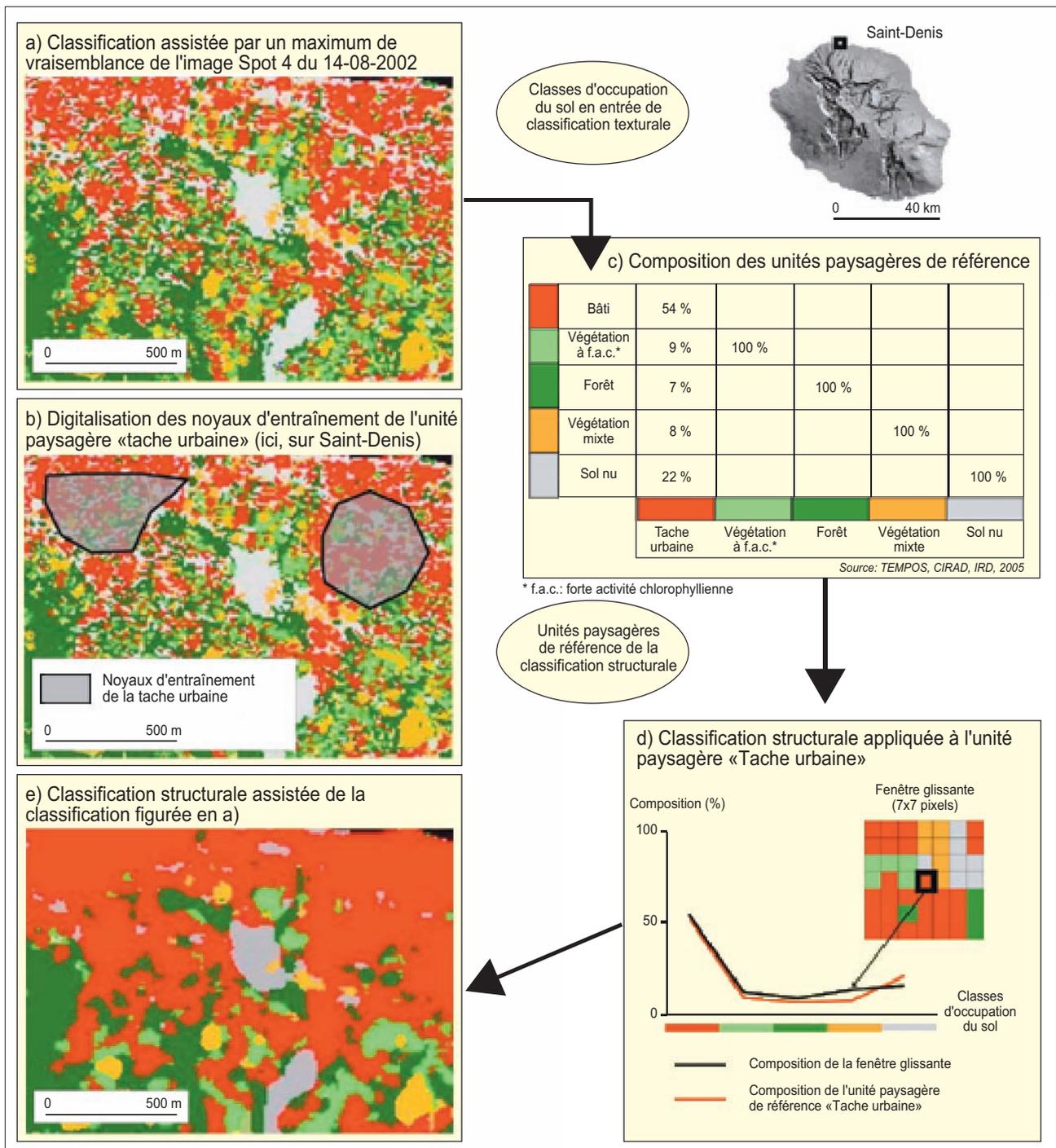
### 2.3 Classification par maximum de vraisemblance

La classification assistée par maximum de vraisemblance consiste à classer les pixels en fonction de leur ressemblance avec les comptes numériques d'objets géographiques de référence préalablement déterminés sur l'image (parcelles d'entraînement) et validés par des relevés de terrain. Le profil numérique des parcelles d'entraînement est alors supposé représentatif du profil numérique de l'ensemble de la classe sur l'image. Les parcelles d'entraînement ont été définies sur les zones stables identifiées à l'issue de l'analyse en composantes principales conduite sur la soustraction d'images (fig. 2). Une première classification en 30 classes a ainsi été construite de façon à obtenir des classes très homogènes sur le plan radiométrique et partiellement cohérentes d'un point de vue thématique. Un regroupement de ces 30 classes en 5 classes thématiques a ensuite été réalisé. Ce regroupement a privilégié la précision spatiale des classes, en élargissant dans le même temps leur portée sémantique.

### 2.4 Classification par analyse structurale

Un traitement structural (2) assisté a été appliqué sur les classifications à l'aide du logiciel OASIS (Francoual, 1994). Cet outil de traitement, précurseur de l'analyse d'image orientée objet (Kressler *et al.*, 2003) et fondé sur la logique floue, est lié au concept d'unité de paysage (Girard, Girard, 1994). L'unité de paysage est une composition stable d'éléments de paysage tels que l'occupation du sol, la pédologie et le relief. L'algorithme de classification implémenté dans OASIS permet de classer les éléments d'une image en fonction de la ressemblance de leur voisinage à des unités paysagères de référence. À chaque unité paysagère de référence est ainsi associée une composition en éléments de paysage sur l'image (fig. 3c). Cette composition peut être déterminée directement par l'utilisateur ou alors via la numérisation de noyaux d'entraînement (3) sur l'image (fig. 3b). La composition du voisinage des éléments de l'image est ensuite analysée avec une fenêtre glissante qui parcourt l'image et dont la dimension est ajustée heuristiquement par l'utilisateur (fig. 3d). En sortie de traitement, chaque élément de l'image est classé dans une unité paysagère de référence. Un « score flou » d'appartenance à l'unité paysagère gradué de 0 (faible appartenance) à 1 (forte appartenance) est attribué à chacun des éléments de l'image. Le traitement OASIS peut porter sur une image brute ou, comme c'est le cas ici, sur image classée.

Dans le cadre de la présente étude, le traitement structural visait à détecter simultanément des unités de paysage simples, composées d'une seule classe d'occupation du sol, et une unité de paysage « tache urbaine », composite, résultant d'un assemblage de plusieurs classes d'occupation du sol (fig. 3c). Une fenêtre glissante de dimension 7x7 pixels (soit 140x140 m) a été utilisée au cours de cette classification (fig. 3d). Le traitement visant à détecter les unités de paysage simples équivalait en fait à appliquer un filtrage majoritaire. Ce filtrage a permis d'obtenir des plages cartographiques plus étendues et homogènes pour ces classes d'occupation du sol (fig. 3e). L'unité de paysage composite « tache urbaine » a été construite en partant de l'idée qu'un espace urbain est un paysage composé de bâtis mais aussi de sols nus (parking, route) et d'espaces végétalisés (parcs, jardins). Dans un premier temps, nous avons déterminé la composition de plusieurs espaces visiblement urbains et représentatifs de la diversité des morphologies urbaines de l'ensemble de l'île (fig. 3b). Des noyaux d'entraînement (4) correspondant à ces zones urbaines ont été numérisés sur les classifications. Les mêmes noyaux ont été utilisés sur les classifications de 1989 et 2002, de façon à définir des compositions de référence comparables aux deux dates. Notons que cette méthodologie ne permet pas de détecter les bâtis isolés



**Figure 3. Procédure de classification par analyse structurale.** À partir de la classification par maximum de vraisemblance (a) et de noyaux d'entraînement digitalisés sur cette classification (b), les compositions de référence des unités paysagères sont déterminées (c). La recherche sur l'image de compositions proches de ces compositions de référence se fait par fenêtre glissante (d). Une classe « tache urbaine » est implémentée au cours de la procédure (e).

et, par conséquent, le phénomène de mitage rural par du bâti isolé n'est pas quantifié ici. Cette précision est importante, car les enjeux liés à la délimitation de la tache urbaine sont cruciaux dans un contexte de lutte contre l'étalement urbain et contre la diminution concomitante des surfaces agricoles à la Réunion.

Par la suite, deux classes « techniques » ont été ajoutées dans les classifications : une classe « pente supérieure à 30 degrés » (zones difficilement classées du fait des ombres et

non affectées par les changements) et une classe « bande littorale » (pour éviter les confusions entre l'écume et le toit blanc des bâtis). Ces deux classes ont été extraites respectivement du Modèle numérique de terrain de la BD ALTI IGN 1997 et d'un *buffer* de 60 mètres de rayon à partir du trait de côte de la BD TOPO IGN 1997. Enfin, les classifications ont été vectorisées en utilisant une fonction de lissage de type *spline*.

À l'issue de ces traitements, les cartographies de l'occupation du sol en 1989 et en 2002 sont valides au 1/100 000. Sept grandes classes thématiques ont été discriminées : la tache urbaine, les sols nus ou très peu végétalisés, la végétation arborée, la végétation à forte activité chlorophyllienne (constituée principalement d'espaces agricoles), la végétation mixte (végétation qui ne correspond pas aux deux autres classes de végétation, c'est-à-dire des espaces de végétation buissonnante ou arbustive), les pentes supérieures à 30 degrés et la bande littorale ([carte 1](#)).

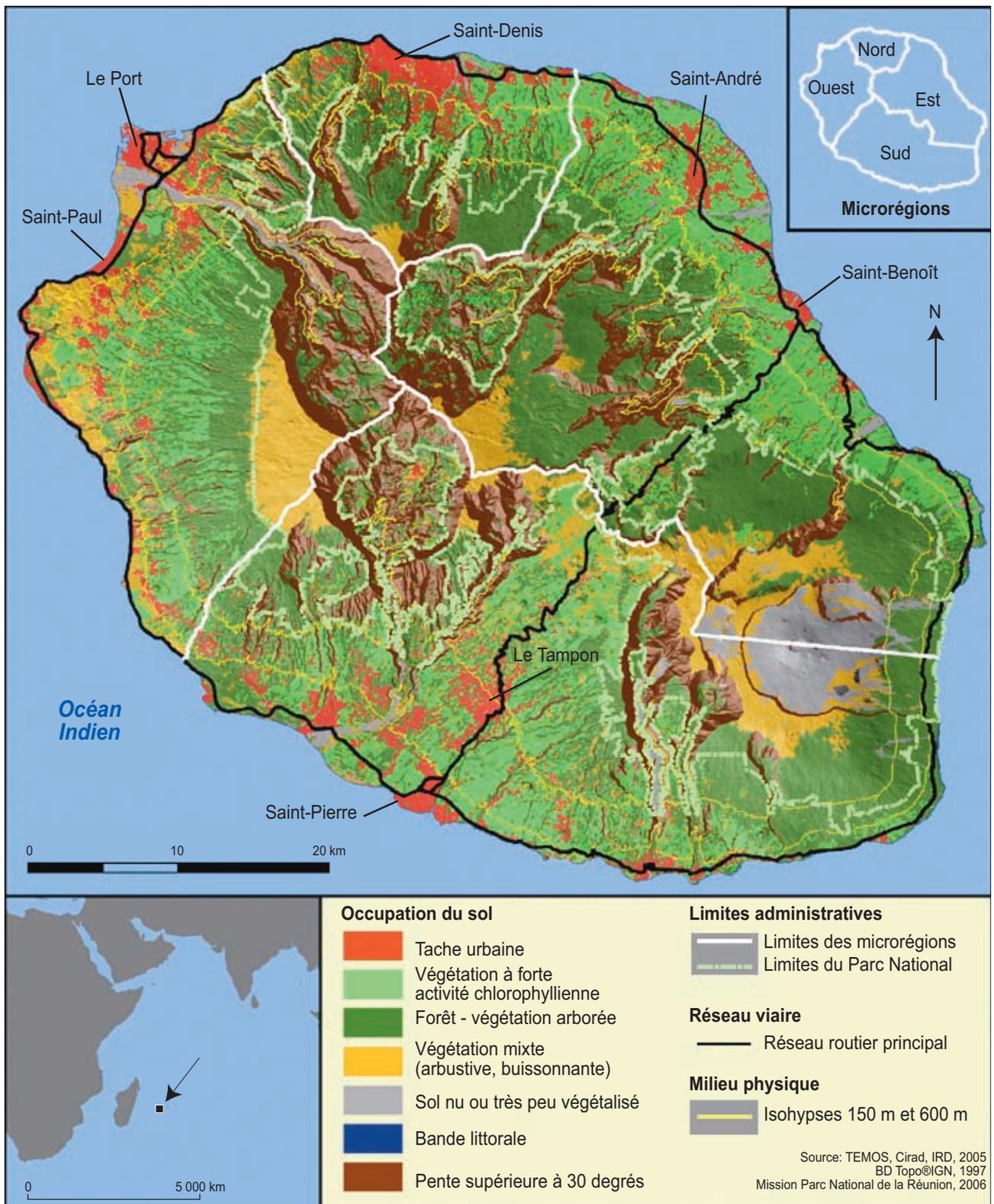
La performance des classifications a été évaluée via un tirage aléatoire stratifié d'environ 50 points par classe, en utilisant en référence des points relevés sur le terrain et sur une image Spot 5 Supermode (résolution 2,5 m) du 21 juillet 2003. La performance finale de chacune des classifications est de 92 % ([tabl. 1](#)). En l'absence d'informations de référence pour l'année 1989, la performance de la classification de l'image Spot 1 de 1989 a été considérée comme équivalente à celle de 2002. La performance estimée de la cartographie des changements est donc celle de 1989 multipliée par celle de 2002, soit  $(0.92)^2 = 85 \%$ .

**Tableau 1. Matrice de performance de la classification de l'image Spot 4 du 14 août 2002** (les classes « pente supérieure à 30 degrés » et « bande littorale » ne sont pas représentées dans cette matrice compte tenu de leur méthode de construction).

Sur la carte	Sur le terrain					Précision réalisateur (vu de la carte)
	Tache urbaine	Sol nu	Végétation mixte	Forêt	Végétation chlorophyllienne active	
Tache urbaine	47	0	0	0	3	95,9 %
Sol nu	1	47	2	0	0	97,9 %
Végétation mixte	0	0	43	1	2	93,5 %
Forêt	1	0	0	44	4	91,7 %
Végétation chlorophyllienne active	0	1	1	3	44	83,0 %
Précision utilisateur (vu du terrain)	94,0 %	94,0 %	93,5 %	89,8 %	89,8 %	

La cartographie des changements est issue de l'intersection des classifications de 1989 et 2002. En considérant uniquement 5 grandes classes d'occupation du sol (en excluant les classes « pente supérieure à 30 degrés » et « bande littorale » qui sont stables), on obtient 16 types de changements possibles et 5 classes de « permanence » ([tabl. 2](#)).

Reprenant plus en détail cette méthodologie, un guide critique d'utilisation des informations produites a été diffusé à l'ensemble des partenaires du projet TEMOS (Lagabrielle *et al.*, 2005). L'objectif de ce document est de privilégier un usage raisonné des informations par les professionnels de l'aménagement. Ce document insiste en particulier sur les limites de ces informations géographiques en termes de validité scalaire, de précision spatiale et de précision sémantique.



**Carte 1. Cartographie de l'occupation du sol à la Réunion en 2002**, réalisée par classification assistée par maximum de vraisemblance et par analyse structurale d'une scène Spot 4 du 14 octobre 2002. Les limites administratives des 4 microrégions et du Parc national de la Réunion sont figurées, ainsi que les isohyètes 150 m et 600 m.

**Tableau 2. Transferts d'occupation du sol de la Réunion entre 1989 et 2002.** Ce tableau se lit par ligne où les pourcentages traduisent la contribution des types d'occupation du sol de 1989 à la constitution de l'occupation du sol en 2002. Trois niveaux de contribution ont été définis en fonction de ces pourcentages (faible, moyen, fort).

		1989						
		Tache urbaine	Sol nu	Végétation mixte	Végétation arborée	Végétation à f. a. c.	Bande littorale	Pente > 30 deg.
2002	Tache urbaine	39 %	4 %	9 %	27 %	22 %		
	Sol nu		60 %	19 %	14 %	6 %		
	Végétation mixte		3 %	67 %	20 %	10 %		
	Végétation arborée			4 %	87 %	9 %		
	Végétation à f. a. c.*			6 %	22 %	72 %		
	Bande littorale						100 %	
	Pente > 30 deg.							100 %

\*Végétation à f. a. c. : à forte activité chlorophyllienne (canne à sucre)

Légende	Contribution forte : 20-30 %	Contribution moyenne : 10-20 %	Contribution faible : 0-10 %	Permanence	Absence de contribution
---------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	------------	-------------------------

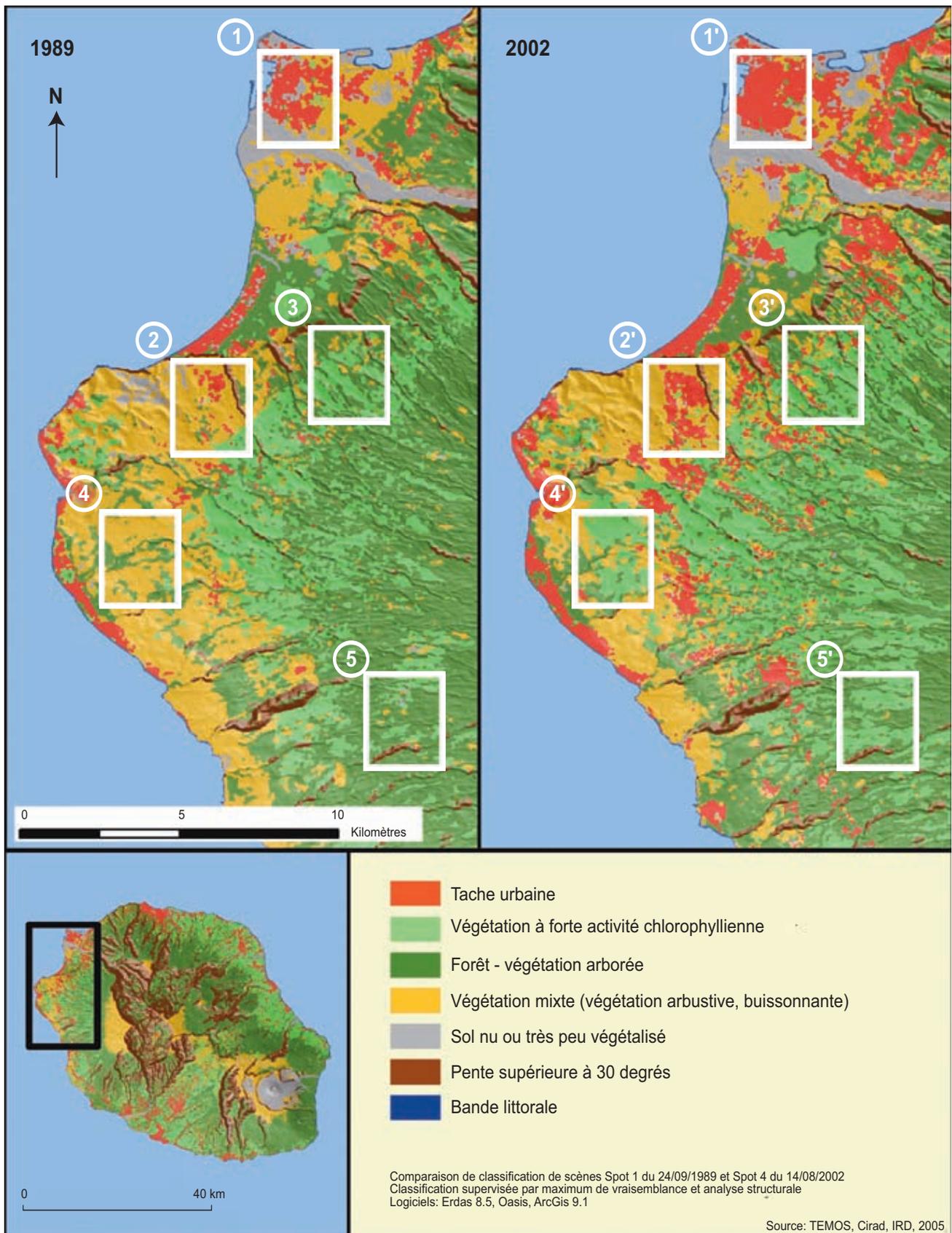
### 3. Résultats

La présentation des résultats est divisée en trois paragraphes: 1) les changements d'occupation du sol sont d'abord analysés globalement, puis 2) en fonction des microrégions, de l'altitude et du zonage en aires protégées. Dans ces analyses, la végétation à forte activité chlorophyllienne active est assimilée à des cultures de canne à sucre ou à des prairies d'élevage. Concluant cette partie, 3) les résultats d'une enquête d'utilisation des données par les professionnels de l'aménagement du territoire à la Réunion sont exposés.

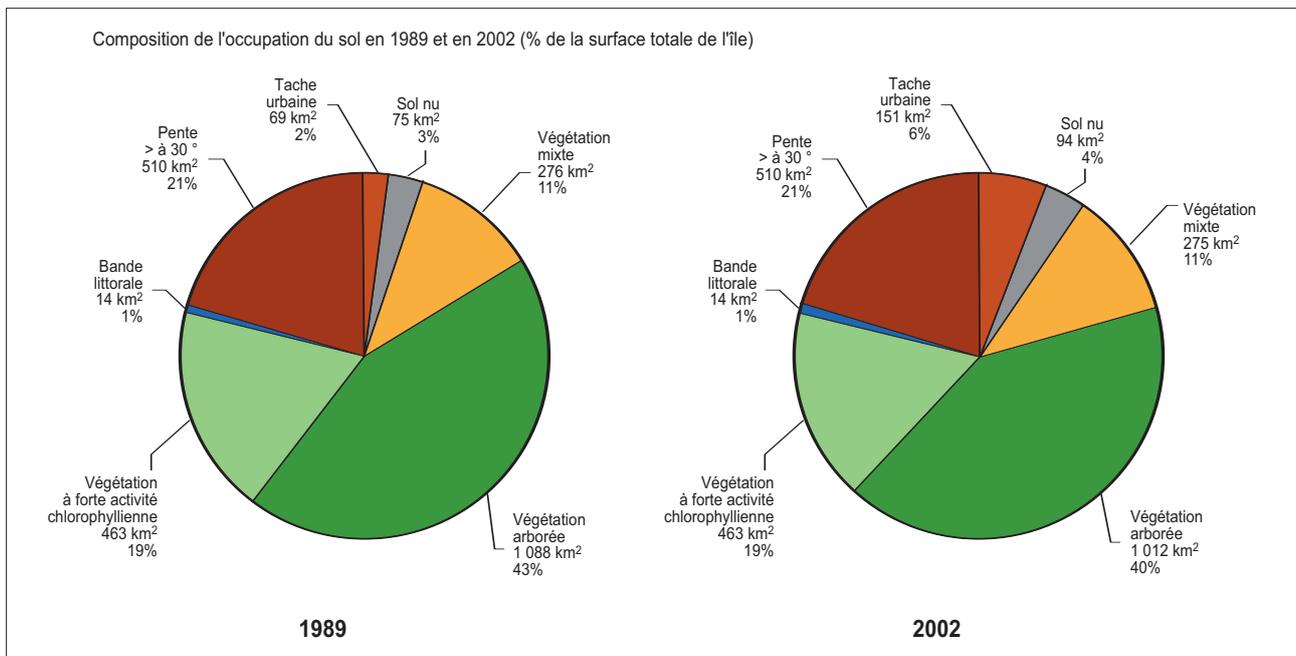
#### 3.1 Analyse des changements d'occupation du sol à l'échelle de l'île (graph. 1 et 2)

Le changement majeur d'occupation du sol au cours de la période 1989-2002 à la Réunion est la croissance de 157 % de la tache urbaine qui passe ainsi de 59 km<sup>2</sup> (2 % de la surface de l'île) à 151 km<sup>2</sup> (6 % de la surface) (graph. 2). Cette croissance urbaine globale procède sans régression, par implantation de nouveaux noyaux urbains, par étalement sur les marges et par comblement des espaces urbains interstitiels (l'expansion verticale des bâtis n'est pas détectée ici) (carte 2). Cette croissance s'est localisée préférentiellement le long des axes routiers. La carte 3 montre bien ce phénomène dans la région Est de Saint-Denis, où l'urbanisation s'est étalée à proximité des tronçons routiers à 4 voies (route nationale) qui ont été ouverts au cours des années 1990 (pour plus détails, cf. Jauze, 1995).

Corrélativement à cette croissance urbaine, les espaces arborés et agricoles régressent sensiblement (respectivement -7 % et -8 %) (graph. 2). En 2002, l'espace agricole représente ainsi 17 % de la surface de l'île (contre 19 % en 1989) (graph. 1). La fraction restante de l'espace est couverte par de la végétation primaire ou secondaire — incluant de la végétation arborée (61 %) ou arbustive (11 %) — et de la végétation diverse sur les pentes supérieures à 30 degrés (21 %). Les sols nus et la bande littorale représentent (en 2002) respectivement 4 % et 1 % de la surface de l'île. La croissance des sols nus au cours de la période (+26 %) est liée principalement à un stress hydrique en 2002.



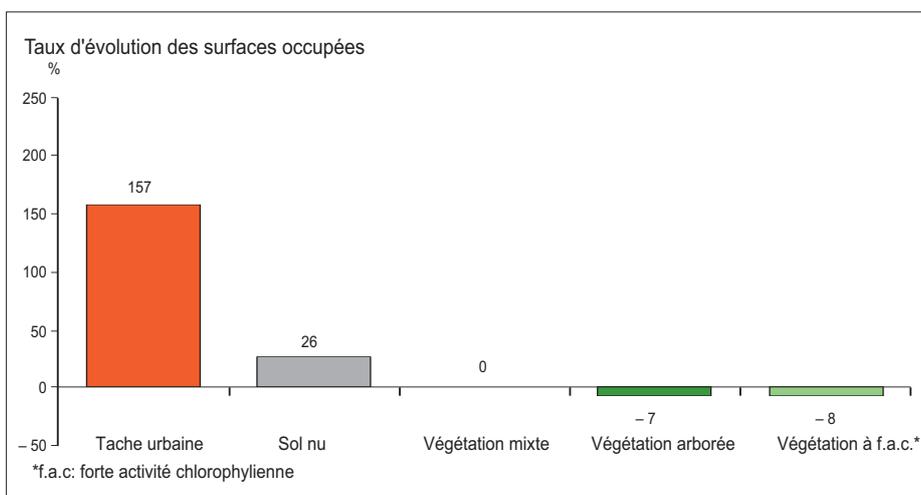
**Carte 2. Cartographie de l'occupation du sol sur le littoral Ouest de la Réunion en 1989 et 2002.** 5 types de changements sont encadrés: 1) densification urbaine par comblement des espaces interstitiels, 2) étalement urbain sur les marges, 3) implantation de nouveaux noyaux urbains, 4) conversion de la végétation mixte en culture de canne à sucre (grâce à une mise en irrigation) et 5) déforestation pour l'implantation de prairies de pâturage dans les Hauts.



**Graphique 1. Composition de l'occupation du sol en 1989 et en 2002 (en km<sup>2</sup> et en pourcentage de la surface totale de l'île)**

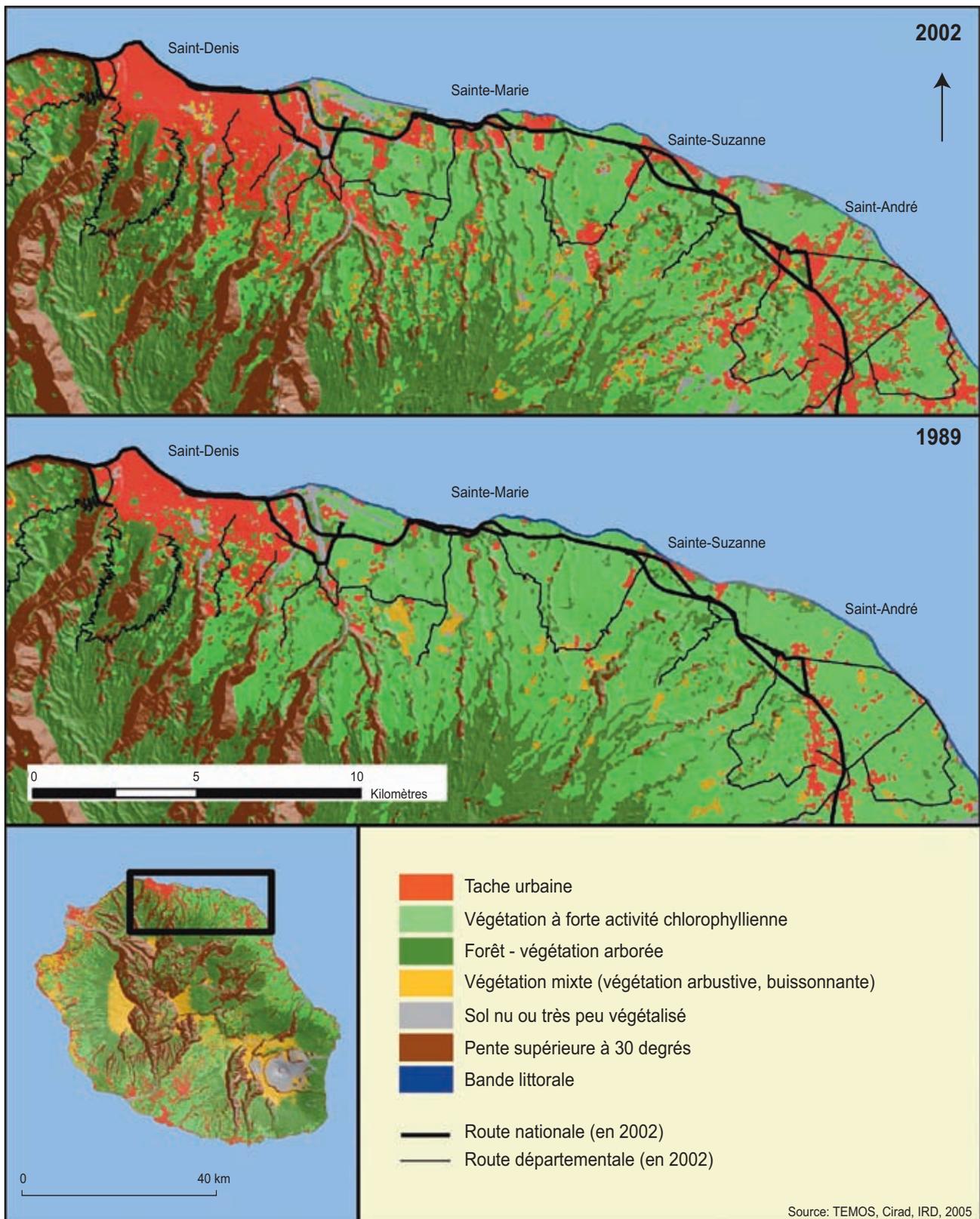
L'analyse des transferts d'occupation du sol à l'échelle de l'île ([tabl. 2](#)) montre que 27 % de la tache urbaine en 2002 a été bâtie sur de la végétation qui était arborée en 1989 et 22 % sur des espaces agricoles. Ce résultat contraste singulièrement avec l'hypothèse généralement admise d'une relation exclusivement bijective entre sole cannière et tache urbaine à la Réunion. Le [tableau 2](#) montre également l'importance des conversions des espaces forestiers en espaces cultivés (22 %). Ce chiffre s'explique principalement par l'ampleur des déforestations pour l'implantation de prairies de pâturage dans les Hauts de l'île (au-delà de 1 000 m d'altitude).

Si, d'un point de vue statistique, on constate une relative stabilité de la surface agricole au cours de la période 1989-2002 ([graph. 1 et 2](#)), l'analyse spatiale révèle que seulement 67 % des espaces agricoles sont identiques aux deux dates. Pour conserver une surface stable, cette activité a donc opéré une véritable migration en altitude. Depuis 1989, 160 km<sup>2</sup>

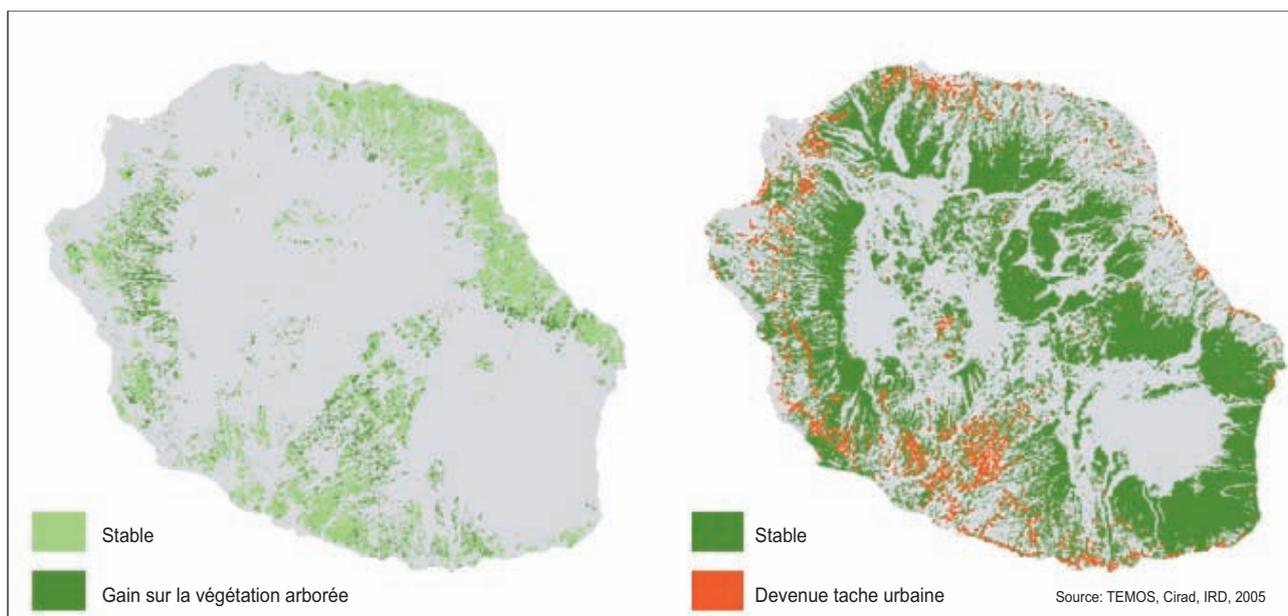


**Graphique 2. Taux d'évolution des surfaces d'occupation du sol à la Réunion entre 1989 et 2002**

d'espaces agricoles ont été convertis en un type d'occupation du sol différent, dont 30 km<sup>2</sup> en espace urbain. Ainsi, si l'agriculture a reculé sur certains espaces entre 1989 et 2002, cette activité a gagné de la surface (+121 km<sup>2</sup>) sur des espaces arborés ou à végétation mixte ([carte 4](#)). Ce gain a été réalisé principalement



**Carte 3. Cartographie de l'occupation du sol en 1989 et en 2002 à l'est de Saint-Denis.** L'urbanisation s'est distribuée de part et d'autre de la 4 voies reliant Saint-Denis à la microrégion Est (inaugurée dans les années 1990). C'est dans la microrégion Est que l'urbanisation a été la plus forte (+239 %). Cette urbanisation s'est faite principalement sur du parcellaire cannier (correspondant ici à de la végétation à forte activité chlorophyllienne). On observe également à Saint-Denis une « vague urbaine » qui remonte sur les marges hautes de l'agglomération.



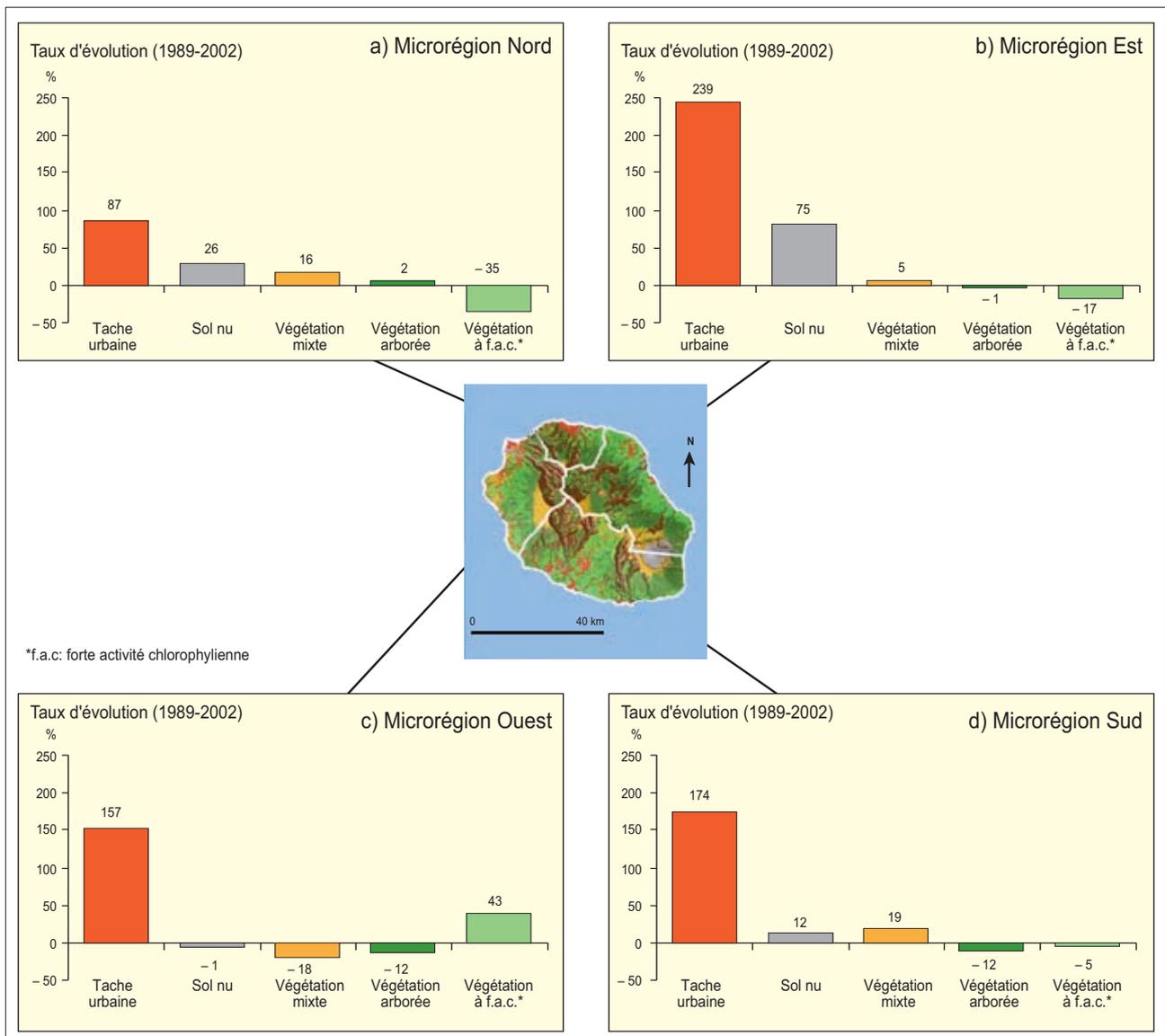
**Carte 4. Deux types de changements de la végétation arborée depuis 1989 : a) La conversion en espace agricole et b) en tache urbaine**

dans les Hauts de l'île, concomitamment au développement des activités d'élevage sur pâturage et dans les Bas sur le littoral Ouest grâce à l'irrigation des espaces canniers.

Actuellement, la végétation non agricole et non urbaine couvre 77 % de la surface de l'île (soit 1922 km<sup>2</sup>). Cette végétation est constituée d'habitats écologiques primaires intacts ou envahis, voire totalement secondarisés (Strasberg *et al.*, 2005). Entre 1989 et 2002, 7,3 % du couvert forestier a disparu. Toutefois, la surface « stable » de forêt entre les deux dates est « seulement » de 884 km<sup>2</sup> (contre un total de 1010 km<sup>2</sup> en 2002). L'importance des faux changements entre la végétation arborée et la végétation mixte explique en grande partie cette variation. Par ailleurs, la forêt est devenue a) un espace agricole (96 km<sup>2</sup>) (prairies d'élevage) et dans une moindre mesure, b) des espaces urbains sur les mi-pentes (40 km<sup>2</sup>) (carte 4).

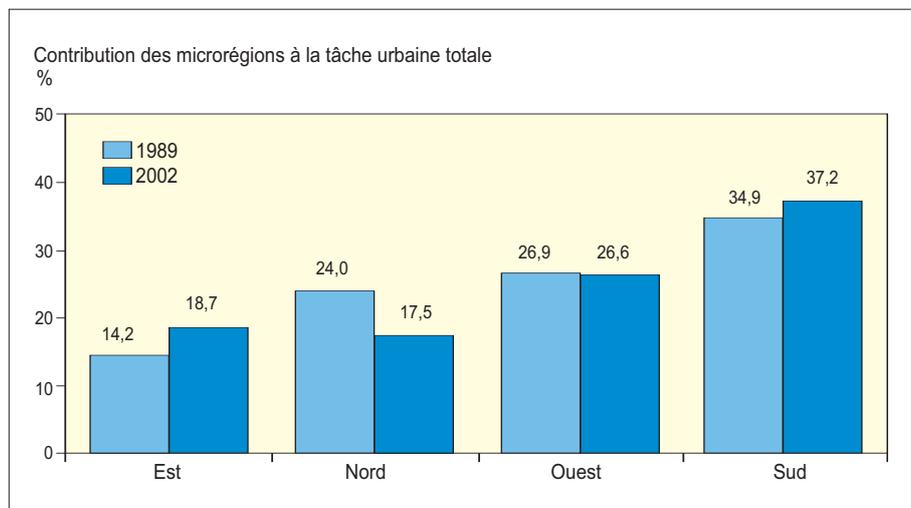
### 3.2 Analyse des changements d'occupation du sol par microrégion

L'analyse des changements d'occupation du sol par microrégion révèle de grandes disparités intrarégionales. La microrégion Est se caractérise ainsi par un très fort étalement urbain (+239 %) au détriment de la végétation à forte activité chlorophyllienne (ici de la culture de canne) (graph. 3b). On retrouve ce même phénomène dans la région Nord, avec toutefois une croissance urbaine beaucoup moins importante (+87 %) (graph. 3a). Dans la microrégion Ouest, l'étalement urbain est dans la moyenne régionale (+153 %) et s'accompagne d'une croissance des surfaces de végétation à forte activité chlorophyllienne (+43 %) consécutive à de grands travaux de mise en irrigation sur le littoral (graph. 3c). Toujours dans la région Ouest, les espaces forestiers sont en nette régression (-12 %) ainsi que la végétation mixte composée ici de savane dégradée et de friches agricoles (-18 %). La microrégion Sud présente une situation relativement similaire avec un étalement urbain important (174 %) au détriment des espaces forestiers mais également agricoles (graph. 3d). La carte 5 synthétise les disparités intrarégionales concernant le type d'espace « consommé » par la tache urbaine. Ainsi, la ville s'est faite sur de la végétation mixte dans l'Ouest, sur des espaces agricoles dans l'Est et principalement sur des espaces boisés dans les Hauts de Saint-Pierre et sur la commune du Tampon.

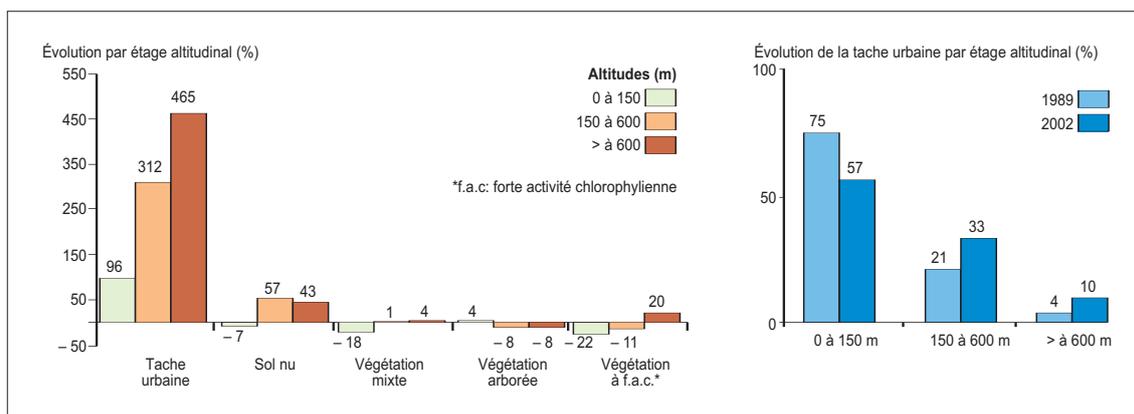


**Graphique 3. Évolution de l'occupation du sol dans les 4 microrégions de la Réunion**

En contradiction avec le discours ambiant, l'analyse de la contribution des microrégions à la tache urbaine totale montre que le poids relatif de l'Ouest en termes de surfaces urbaines est resté identique à ce qu'il était en 1989 (27 %) (graph. 4). Parallèlement, la dynamique urbaine la plus forte concerne l'Est qui représente ainsi, en



**Graphique 4. Contribution des microrégions à la tache urbaine totale en 1989 et en 2002**



Graphique 5. Évolution et distribution de l'occupation du sol en fonction de l'altitude

2002, près de 20 % de la masse urbaine totale de l'île (contre 14 % en 1989), ce qui montre une évolution nette des équilibres intrarégionaux.

### 3.3 Changements d'occupation du sol et altitude

Pour cette analyse, nous avons divisé l'espace en trois étages altitudinaux : les Bas (0-150 m), les mi-pentes (150-600 m) et les Hauts (>600 m) (carte 1). Entre 1989 et 2002, la croissance urbaine a été plus forte sur les mi-pentes (+312%), et sur les Hauts de l'île (+465%) que sur l'ensemble de l'île (+153%) (graph. 5a). Cette croissance urbaine spectaculaire traduit un phénomène majeur de montée en altitude de la tache urbaine. Le poids relatif des Bas en termes de surface urbaine s'est ainsi réduit, passant de 75 % à 57 % (graph. 5b). Corrélativement, la contribution des étages altitudinaux supérieurs à la tache urbaine totale de l'île a largement augmenté, passant de 21 à 33 % pour les mi-pentes et de 4 à 10 % pour les Hauts. Corrélativement, les espaces agricoles sont en net recul dans les Bas de l'île (-22 %), ce qui correspond à une réduction de la sole cannière au profit de la tache urbaine. Par ailleurs, on constate que les espaces forestiers ont plus largement été consommés dans les Hauts (-8 %), notamment au profit des pâturages (+20 % de végétation à forte activité chlorophyllienne au-delà de 600 m d'altitude).

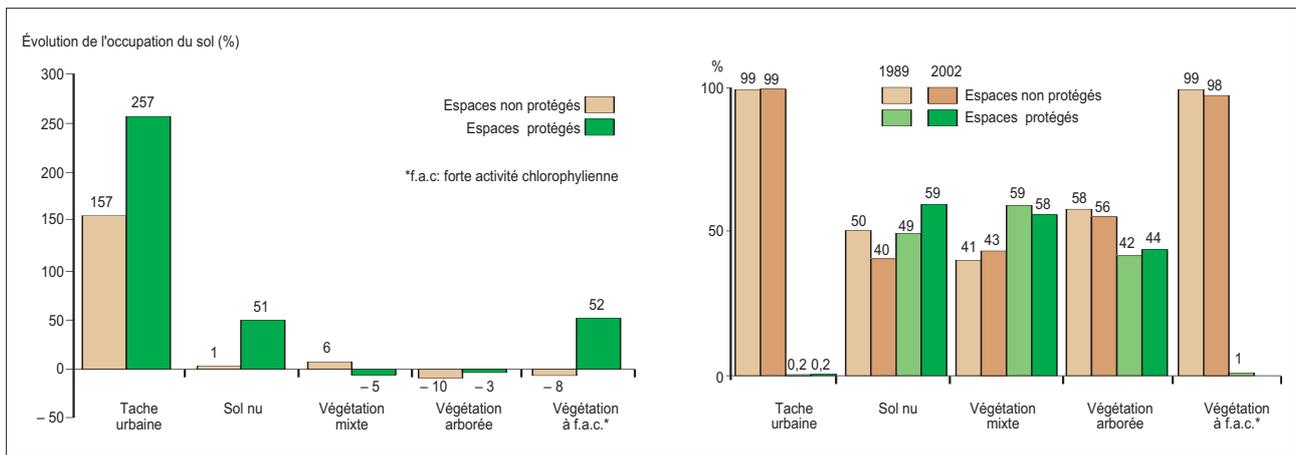
### 3.4 Changements d'occupation du sol dans les aires protégées

Pour réaliser cette analyse, nous avons retenu les catégories d'aires protégées listées dans le tableau 3 et reconnues par l'UICN (1994). Depuis la récente création du Parc national de la Réunion en 2007, les espaces protégés couvrent 46,6 % de la surface de

Tableau 3. Catégories d'aires protégées définissant l'espace protégé (UICN, 1994).

Catégorie UICN	Catégorie d'aire protégée à la Réunion	Surface en km <sup>2</sup>	(% de la surface totale)
I	Réserve biologique forestière intégrale	277,9	(11,1 %)
II	Zone centrale du Parc national (dont cœur cultivé et habité)	1 048,3	(41,7 %)
IV	Réserve naturelle	37,5	(1,5 %)
	Arrêté de protection de biotope	19,5	(0,8 %)
	Réserve biologique domaniale	75,8	(3,0 %)
	Site du Conservatoire du Littoral	8,1	(0,3 %)
Toutes catégories confondues		1 071,1	(42,6 %)





**Graphique 6. Évolution et distribution de l'occupation du sol dans les espaces protégés et dans les espaces non protégés à la Réunion**

national en 2007 autant qu'elles augurent des problèmes de gestion de l'espace auxquels sera confrontée cette grande aire protégée, couvrant 41,7 % de la surface de l'île.

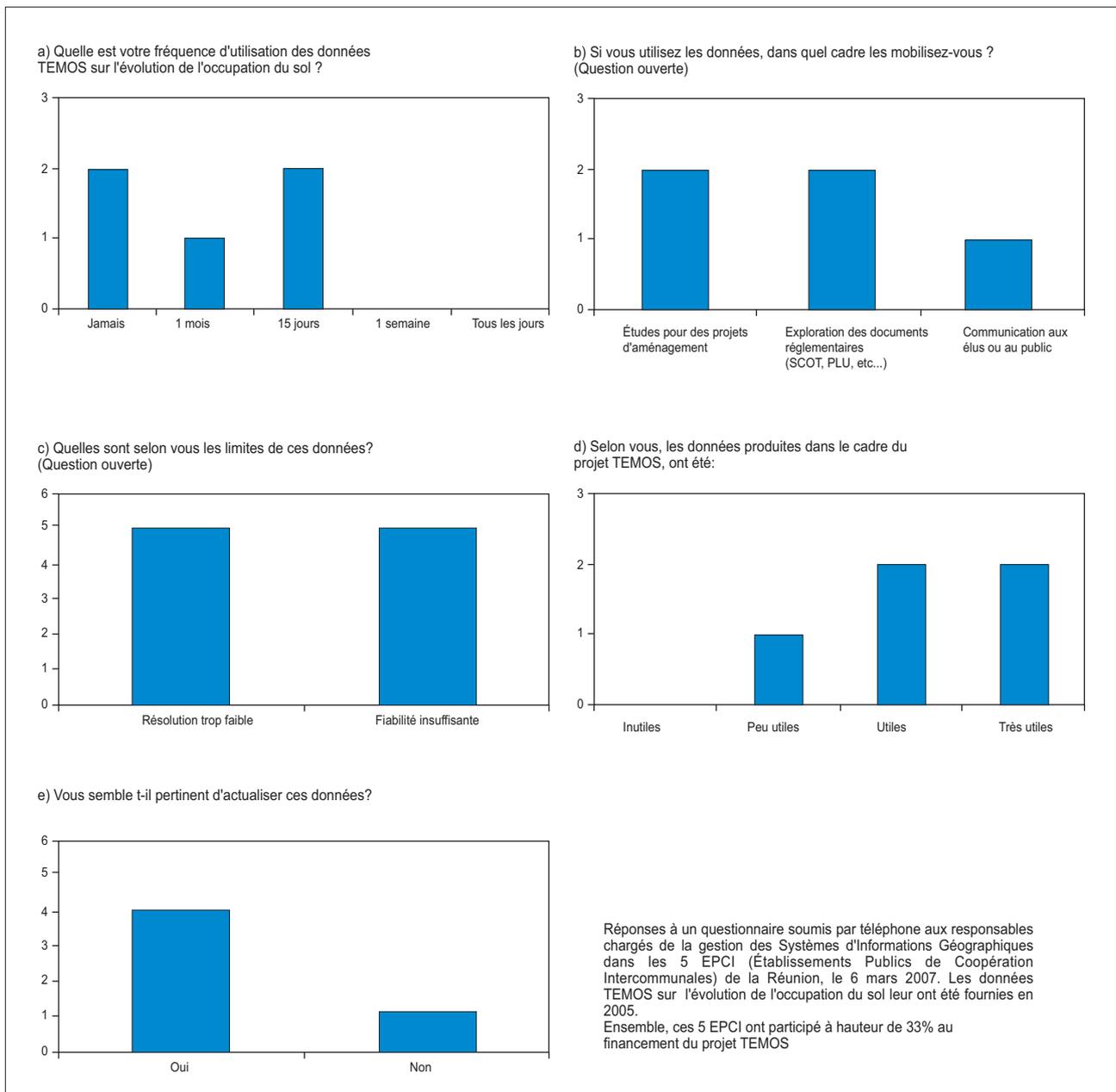
### 3.5 Utilisation des données par les acteurs opérationnels à la Réunion

Nous avons cherché à savoir comment les professionnels de l'aménagement utilisaient les informations produites sur les changements d'occupation du sol. Un questionnaire a été soumis aux responsables des cellules SIG des cinq EPCI (Établissements publics de coopération intercommunale) de la Réunion (graph. 7). Les résultats de cette enquête succincte montrent que trois EPCI utilisent les données pour leurs projets d'aménagement, pour élaborer des documents de planification ou pour communiquer avec le public et les élus ; 2 EPCI n'utilisent pas les données par manque de connaissance de celles-ci ou parce qu'ils ne les considèrent pas comme pertinentes. À l'inverse, quatre responsables sur cinq jugent que le projet a été utile et souhaitent une actualisation de ces informations.

## 4. Discussion

Les résultats quantitatifs de cette étude contribuent à une objectivation des débats sur l'aménagement urbain, sur la maîtrise du foncier agricole et sur la planification de la conservation de la biodiversité à la Réunion. Toutefois, la résolution des données, la nature et le nombre des classes d'occupation du sol constituent des limites à l'interprétation des résultats. Ainsi, certains phénomènes spatiaux comme le mitage rural ne sont pas détectés. L'assimilation de la végétation à forte activité chlorophyllienne à des espaces agricoles constitue également une hypothèse très forte, d'autant plus que les grands types de culture ne sont pas distingués (cane à sucre, prairie). Par ailleurs, les classes de végétation arborée et de végétation mixte fournissent peu d'indications sur l'état écologique de cette végétation, ce qui limite l'interprétation de ces résultats pour une évaluation de la transformation des milieux indigènes au cours de la période. Cependant, la fiabilité globale de la détection des changements (85 %) est plutôt satisfaisante. Cette étude contribue ainsi à fixer une qualité de référence pour des projets conduits sur des espaces similaires, selon une méthode proche.

Une des conclusions marquantes de ce travail est la remise en cause, à la Réunion, de l'idée d'une urbanisation exclusivement consommatrice d'espaces agricoles. Ainsi, au cours de la période 1989-2002, l'urbanisation s'est faite à parts égales sur de la végétation arborée ou mixte et sur de la végétation à forte activité chlorophyllienne, caractéristique



**Graphique 7. Résultats de l'enquête sur l'utilisation des données par les acteurs opérationnels à la Réunion**

des cultures. Les résultats confirment également la rapidité et l'ampleur de l'étalement urbain qui touche désormais l'ensemble de l'île, et plus particulièrement les mi-pentes, même si la frange littorale concentre toujours la majeure partie des espaces urbanisés. L'analyse des dynamiques urbaines par microrégions révèle d'importantes disparités intrarégionales. On constate ainsi un processus de réajustement de l'urbanisation vis-à-vis de la microrégion Nord (agglomération dionysienne), en particulier dans l'Est. Plus marginalement, la croissance de l'urbanisation et de l'agriculture dans les limites actuelles du Parc national constitue un phénomène remarquable par son amplitude, même si les surfaces concernées restent très réduites. L'analyse spatiale des changements d'occupation du sol révèle par ailleurs que des bilans surfaciques neutres peuvent dissimuler des dynamiques spatiales d'envergure. Ainsi, tandis que la surface totale des espaces agricoles est restée pratiquement stable entre 1989 et 2002, la distribution spatiale des activités agricoles a amorcé un mouvement migratoire de grande ampleur vers

les Hauts. Ce mouvement de translation en altitude s'est accompagné d'une conversion aux activités d'élevage. La réduction des surfaces cannières a en partie été compensée par l'implantation de nouveaux périmètres irrigués, notamment dans le Sud et l'Ouest de l'île. On peut toutefois s'interroger sur le destin de ces espaces canniers qui sont aujourd'hui englobés dans une matrice rurale très largement mitée, tandis que les besoins en eau des espaces urbains mitoyens vont en s'accroissant.

Si l'organisation en auréoles concentriques des modes d'occupation du sol perdure à la Réunion sous l'effet des facteurs historiques et environnementaux, les fronts urbains et agricoles ont migré en altitude selon un « effet domino » centripète. Cette migration a des conséquences écologiques. Les habitats indigènes réunionnais sont ainsi de plus en plus isolés en altitude, alors que les enjeux liés à leur conservation sont d'autant plus importants que ces habitats et les espèces qui leur sont inféodées sont des reliques uniques de biodiversité à l'échelle mondiale. En particulier, la pérennité des habitats écologiques de basse et moyenne altitude est aujourd'hui extrêmement menacée. Cette menace concerne autant les milieux eux-mêmes que les flux de matières, d'espèces et de gènes dont ils dépendent. En réponse à cette vulnérabilité structurelle liée à un fractionnement à grande échelle, la délimitation de la future zone d'adhésion du Parc national, périphérique au cœur, pourrait intégrer un principe de continuité écologique terre-mer via la création de corridors encapsulant des gradients altitudinaux complets « du battant des lames au sommet des montagnes ». En l'absence de programme de restauration écologique d'envergure, ces corridors pourraient incorporer des espaces dédiés aux activités agricoles mettant en œuvre des pratiques compatibles avec le fonctionnement écologique des milieux indigènes situés en amont et en aval.

Compte tenu des dynamiques spatiales observées à la Réunion, la protection des milieux naturels et des espaces agricoles dépend directement de la maîtrise de l'étalement des villes et par conséquent d'une densification des espaces urbains. Cette densification implique de grandes modifications des modes de vie. Actuellement, le non-respect des réglementations en matière de construction (30 % de constructions illégales) et la carence des contrôles de légalité ont conduit à un étalement de la ville peu maîtrisé. Ce relâchement de l'intensité de la relation centre-périphérie (Enault, 2006 ; Lajoie, Actif, 2001) a eu un impact fort sur la qualité de vie des Réunionnais (dispersion des services, voiries et réseaux mal dimensionnés, etc.). À une échelle plus large, la disparition des milieux naturels et des paysages agricoles de la Réunion constitue autant d'atteintes à cette qualité de vie et grève le potentiel touristique de l'île. Rendre les villes attractives pour les densifier serait donc paradoxalement le meilleur gage de durabilité écologique, sociale et économique donné à l'île de la Réunion. Cette idée n'est pas nouvelle, mais cette étude des changements d'occupation du sol au cours des deux dernières décennies à la Réunion, l'étaye quantitativement. De ce point de vue, les résultats et les données du projet sont susceptibles de contribuer à l'élargissement et à la démocratisation du débat sur l'avenir de l'île, en constituant un support de participation citoyenne. Ils peuvent également s'envisager en termes pédagogiques comme un outil de sensibilisation, à destination des publics scolaires.

## 5. Conclusion

Où a augmenté la tache urbaine ? Qu'est devenue la végétation de type agricole qui a disparu ? Où les espaces naturels ont-ils été transformés ? En apportant une réponse quantitative et localisée à ces questions d'aménagement récurrentes, cette étude a contribué à un renouvellement des représentations des dynamiques territoriales à la Réunion.

L'analyse de ces dynamiques révèle une montée rapide des anneaux urbains et agricoles sur les flancs de l'île. Ce mouvement global centripète, associé à une intensification des activités humaines, questionne la durabilité des processus écologiques, économiques et sociaux dans cet espace insulaire. Il semble donc urgent de développer une stratégie de gestion intégrée de l'île, pour préserver ses ressources et en garantir la résilience. Les principes de cette gestion sont universels et reposent sur la densification urbaine, la protection des espaces agricoles et naturels ainsi que des flux et processus dont ils dépendent. Si le Schéma d'aménagement régional intègre théoriquement ces lignes stratégiques, son application à l'échelle locale reste néanmoins soumise à de nombreuses incertitudes. Les données produites dans le cadre de cette étude pourraient ainsi enrichir les réflexions d'une société insulaire réunionnaise en pleine mutation, qui s'interroge sur la durabilité des choix d'utilisation de l'espace, dans un contexte de mondialisation des échanges.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des institutions réunionnaises et les chercheurs qui se sont associés à la réalisation de cette étude de 2003 à 2005. Le projet TEMOS a été financé à parts égales par le Conseil régional de la Réunion, l'IRD-Cirad et les cinq intercommunalités de l'île.

## Notes

1. Le projet TEMOS a bénéficié d'un accès libre à la base de données images BD ISLE. La mise à disposition de cette base de données par le Centre national d'études spatiales a pour objectif de démocratiser l'utilisation des données satellitaires et de favoriser le développement de nouvelles applications pour l'observation et le suivi spatial des dynamiques biophysiques et humaines.
2. Le terme « structural » est utilisé pour désigner les méthodes de traitement d'image intégrant une analyse des valeurs numériques ou thématiques de l'environnement des pixels. À l'inverse, les approches pixel à pixel se limitent à une classification des pixels en fonction de leur compte numérique unitaire.
3. L'expression « noyau d'entraînement » désigne les polygones numérisés pour estimer la composition des unités paysagères de référence lors d'une classification structurale par analyse en composantes paysagères (Francoual, 1994). Cette expression est l'équivalente de « parcelle d'entraînement » pour la classification par maximum de vraisemblance.
4. Un rapport d'analyse des résultats a été remis à la Région Réunion (Metzger, 2005).

## Références

- BAPPEL E. (2005). *Traitements de l'image et du signal*. Saint-Denis: Université de Saint-Denis, thèse de doctorat, 278 p.
- BENJAMIN D., GODARD H. (1999). *Les Outre-Mers français, des espaces en mutation*. Gap, Paris: Ophrys, coll. « Géophrys », 267 p. ISBN: 2-7080-0916-8.
- CADET T. (1980). *La Végétation de l'île de la Réunion, étude phytoécologique et phytosociologique*. Aix-en-Provence: Université d'Aix-Marseille, thèse de doctorat en biologie, 312 p.
- CHATELAIN M.-C. (1993). *Urbanisation et aménagement comparés de Saint-Denis et de Saint-Pierre de la Réunion depuis 1946*. Nanterre: Université de Paris X, thèse de doctorat en géographie, 1 101 p.
- CHAVEZ P.S., MACKINNON D.J. (1994). « Automatic detection of vegetation changes in the Southwestern United States using remotely sensed images ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 5, p. 571-583.
- DEFOS DU RAU J. (1960). *L'île de la Réunion, étude de géographie humaine*. Bordeaux: Université de Bordeaux, thèse de doctorat en géographie, 716 p.

- ENAUULT C. (2006). «Étalement et morphologie urbaine des communes de l'Île de la Réunion». [http://thema.univ-fcomte.fr/IMG/pdf/Article\\_Reunion.pdf](http://thema.univ-fcomte.fr/IMG/pdf/Article_Reunion.pdf). Consulté le 2 mars 2007.
- FRANCOUAL T. (1994). *Oasis, notice d'utilisation du logiciel*. Paris: Laboratoire de Science des sols et Hydrologie de l'INA-PG, 18 p.
- GIRARD C.M., GIRARD M.-C. (1994). «Aide à la cartographie d'unités paysagères par une méthode d'analyse du voisinage des pixels: application en Basse Normandie». *Photo-interprétation*, n° 3-4, p. 145-154.
- GIRARD M.-C., GIRARD C.M. (1999). *Traitement des données de télédétection*. Paris: Dunod, coll. «Technique et ingénierie. Série Environnement», XXII-529 p. ISBN: 2-10-004185-1.
- INGLADA J. (2001). *État de l'art en détection de changements sur les images de télédétection*. Toulouse: CNES, 20 p.
- JAUZE J.-M. (1995). «À l'Est, la ville fait craquer ses limites». *Économie de la Réunion*, n° 76, p. 4-8.
- JAUZE J.-M., NINON J. (2006). «Dynamiques et expressions de la périurbanisation à la Réunion». *Les Cahiers d'Outre-Mer*, vol. 52, n° 206.
- KRESSLER F., KIM Y., STEINNOCHER K. (2003). «Object-oriented land cover classification of panchromatic KOMPSAT-1 and SPOT-5 data». *Proceedings of IGARSS 2003 IEEE*, Toulouse.
- LAGABRIELLE E., METZGER P., MARTIGNAC C., DURIEUX L., GRELLET G. (2005). *Guide critique d'utilisation des informations produites dans le cadre du projet TEMOS*. Saint-Denis de la Réunion: Cirad-IRD.
- LAJOIE G., ACTIF N. (2001). «Des villes-jardins qui s'évalent depuis dix ans in Dossier: La Ville s'évalent». *Économie de la Réunion*, n° 108, p. 16-19.
- MARTIGNAC C. (2006). *Maintien d'une filière dominante ou projet de territoire: le cas du sucre à la Réunion*. Montpellier: Université de Montpellier III, thèse de doctorat en géographie, 390 p.
- MARTIGNAC C., PARIENTE P. (2003). «Canne à sucre, état des lieux: les planteurs entre patrimoine et productivité». *Économie de la Réunion*, n° 114, p. 12-14.
- MAS J.F. (2000). «Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement». *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n° 4, p. 349-362.
- METZGER P. (2005). *Les Lieux et les mécanismes de la dynamique urbaine à la Réunion*. Rapport à la région Réunion. Saint-Denis: IRD, 339 p.
- MOISAN Y., BERNIER M., DUBOIS J.M.M. (1999). «Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multitudes à l'aide de l'analyse en composantes principales». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n° 6, p. 1149-1167.
- MUCHONEY D.M., HAACK B.N. (1994). «Change detection for monitoring forest defoliation». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, n° 10, p. 1243-1251.
- SAND G. (1863). «Compte rendu de *Notes sur l'île de la Réunion (Bourbon)*, par M.L. Maillard». *La Revue des deux mondes*.
- SINGH A., HARRISON A. (1985). «Standardized principal components». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, n° 6, p. 883-896.
- SONG C., WOODCOCK C.E., SETO K.C., LENNEY M.P., MACOMBER S.A. (2001). «Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?». *Remote Sensing and Environnement*, vol. 75, p. 30-244.
- STRASBERG D., ROUGE M., RICHARDSON D.M., BARET S., DUPONT J., COWLING R.M. (2005). «An assessment of habitat diversity, transformation and threats to biodiversity on Reunion Island (Mascarene Islands, Indian Ocean) as a basis for conservation planning». *Biodiversity and Conservation*, vol. 14, n° 12, p. 3015-3032.

- COMMISSION MONDIALE DES AIRES PROTÉGÉES (1994). « Lignes directrices pour les catégories de gestion des aires protégées ». Cambridge: United Nations Environment Programme. Conservation Commons. World Conservation Monitoring Centre. <http://www.unep-wcmc.org/protected%5Fareas/categories/fra/>
- ULBRICHT K.A., HECKENFORD W.D. (1998). « Satellite images for recognition of landscape and landuse changes ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 53, p. 235-243.

### **Adresses des auteurs**

Erwann Lagabrielle, Cirad-Université de la Réunion, Station de La Bretagne, BP 20, 97408 Saint-Denis  
Messagerie Cedex 9. Courriel : [erwann.lagabrielle@cirad.fr](mailto:erwann.lagabrielle@cirad.fr)

Pascale Metzger, IRD. Courriel : [pascale.metzger@la-reunion.ird.fr](mailto:pascale.metzger@la-reunion.ird.fr)

Cécile Martignac, Cirad. Courriel : [cecile.martignac@cirad.fr](mailto:cecile.martignac@cirad.fr)

Bernard Lortic, IRD. Courriel : [Bernard.Lortic@bondy.ird.fr](mailto:Bernard.Lortic@bondy.ird.fr)

Laurent Durieux, Joint Research Center. Courriel : [laurent.durieux@jrc.it](mailto:laurent.durieux@jrc.it)