

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

**Approche géomatique pour la classification des paysages et
applicabilité des modèles de pertes de sols :
bassin versant du Simeto, Sicile, Italie**

par
Annie Clark, 1969 -

I-1669

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

BIBLIOTHÈQUE U.S.

20 mai 1999

© Annie Clark, 1999

Résumé

En Sicile, la géologie, l'agressivité climatique et la pression anthropique rendent le milieu fragile aux actions de l'érosion hydrique. La télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG) sont de plus en plus appréciés pour l'étude des phénomènes de surface. Des études antérieures ont porté sur l'intégration des paramètres commandant l'érosion des sols à l'aide d'un SIG et de la télédétection en utilisant un modèle empirique basé sur l'USLE. Toutefois, les échelles de perception du phénomène d'érosion (parcelle) et les échelles régionales de la télédétection sont très divergentes. Le choix d'une échelle d'espace entraîne généralement certaines contraintes d'utilisation qui ne sont pas toujours respectées. L'hétérogénéité spatiale affecte tous les paramètres des modèles de pertes de sols quand ils sont appliqués à de vastes étendues. Il est donc important d'inciter à la prudence vis-à-vis de la généralisation trop rapide des modèles de pertes de sols sur de grandes étendues. Le bassin du Simeto, d'une superficie de 4177 km², possède une grande hétérogénéité spatiale sur plusieurs plans :

- au niveau géologique, il comporte des secteurs de roches volcaniques récentes en bordure de l'Etna, des secteurs calcaires, marnocalcaires, gypseux et argileux dans les bassins sédimentaires et des secteurs d'accumulations alluviales récentes dans les plaines.
- au niveau physiographique et géomorphologique, le Simeto a des altitudes variant de 10 m dans les plaines à plus de 2000 m en région montagneuse. Les paysages de glacis et de terrasses cultivées en céréales alternent avec des entailles d'érosion vives et des zones à solifluxion active, et contrastent avec des secteurs à forte pierrosité.
- au niveau climatique, il existe un contraste marqué entre le sud et le nord du bassin dû à l'effet du relief, comme le montre l'analyse d'une trentaine d'années de données pluviométriques.

Ainsi, pour être en mesure de spatialiser les pertes de sols à l'aide d'un modèle de pertes de sols à l'échelle d'un vaste bassin versant (plus de 1 000 km²), il est avantageux de représenter la diversité spatiale du paysage en fonction des risques d'érosion en utilisant la cartographie écologique couplée aux SIG et à l'imagerie satellitaire. La création d'un modèle cartographique à l'aide de ces outils cherche à mettre en évidence une mosaïque d'unités de paysage d'après des ensembles géographiques (type de relief, nature des dépôts de surface, nature du substratum rocheux et type de végétation) sur lesquels il est possible ou impossible d'appliquer l'USLE (Universal Soil Loss Equation).

Table des matières

Liste des figures _____	IV
Liste des tableaux _____	V
1. Introduction _____	7
1.1. Problématique _____	8
2. Érosion hydrique _____	10
2.1. Formes et processus _____	10
2.2. Notion de risque d'érosion hydrique _____	12
2.3. Risque d'érosion hydrique en milieu méditerranéen _____	12
3. Modélisation des processus d'érosion _____	15
3.1. Modèles de pertes de sols _____	15
3.1.1. Modèles empiriques _____	15
3.1.2. Modèles physiques _____	16
3.2. Intégration d'une dimension spatiale et temporelle _____	17
3.3. Choix d'un modèle _____	18
3.4. Modèle de pertes de sols USLE _____	19
3.4.1. Pourquoi l'USLE _____	19
3.4.2. USLE : équation universel de pertes de sols _____	19
3.4.3. Limites de confiance de l'USLE _____	20
4. Cartographie écologique _____	22
4.1. Approche cartographique _____	22
4.2. Approche écologique _____	22
4.2.1. Qu'est ce que l'écologie ? _____	22
4.3. Cartographie des unités écologiques _____	23
4.3.1. Niveau de perception _____	24
5. Cadre général de l'étude _____	26

5.1.	Hypothèses de recherche _____	26
5.2.	Objectifs de recherche _____	26
5.3.	Site d'étude : le Simeto en Sicile, Italie. _____	26
5.3.1.	La Sicile : localisation et description générale _____	26
5.3.2.	Caractéristiques physiques _____	28
5.3.3.	Le Simeto : localisation _____	29
6.	Intégration et représentation dans un SIG _____	32
6.1.	Données recueillies pour la réalisation de l'étude _____	33
6.2.	Outils utilisés pour la réalisation de l'étude _____	33
6.3.	Caractéristiques des pluies _____	34
6.3.1.	Données pluviométriques _____	34
6.3.2.	Interpolation spatiale des précipitations _____	37
6.4.	Modèle numérique d'altitude _____	39
6.4.1.	Données dérivées du MNA _____	40
6.4.2.	Représentation cartographique _____	40
6.5.	Nature des roches et des sols _____	41
6.5.1.	Données lithologiques et pédologiques _____	41
6.5.2.	La cartographie des données lithologiques et pédologiques _____	41
6.6.	Images satellitaires _____	45
6.6.1.	Données de télédétection _____	45
6.6.2.	Traitements numériques _____	45
6.6.3.	Classification des images _____	46
6.6.4.	Intégration dans un SIG _____	47
7.	Présentation et analyse des résultats _____	48
7.1.	Hétérogénéité spatiale du bassin versant le Simeto _____	48
7.1.1.	Conditions physiographiques : relief et pentes _____	48
7.1.2.	Conditions pluviométriques : caractéristiques des pluies _____	52
7.1.3.	Conditions de la végétation : types de couverts _____	57

III

7.1.4.	Conditions géologiques et pédologiques : nature des roches et des sols	59
7.2.	Analyse de correspondance	63
7.2.1.	Paysage 1 : les zones d'accumulation alluviale	65
7.2.2.	Paysage 2 : les zones argileuses	66
7.2.3.	Paysage 3 : les zones de calcaire	68
7.2.4.	Paysage 4 : Les zones volcaniques	68
7.2.5.	Paysage 5 : Zones de séquences de flyschs	68
7.3.	Analyse du paysage à travers le modèle à l'aide de requêtes	71
8.	Interprétation des résultats	74
8.1.	Améliorations par rapport aux travaux antérieurs	74
8.2.	Limites et faiblesses de l'étude	74
8.3.	Conclusion face aux hypothèses et aux objectifs	75
8.4.	Implications possibles de l'étude	76
9.	Conclusion	77
10.	Références	78

Liste des figures

1: Unités de paysage _____	24
2: Carte de l'Italie _____	27
3: Réseau hydrographique du Simeto _____	31
4: Étapes méthodologiques: intégration et représentation dans un SIG _____	32
5: Stations météorologiques _____	36
6: Carte du substrat rocheux _____	42
7: Carte des sols _____	43
7b: Légende la carte des sols _____	44
8: Modèle numérique d'altitudes (MNA) _____	49
9: Carte des pentes _____	51
10: Précipitations moyennes annuelles (1960-1988) _____	52
11: Précipitations moyennes mensuelles (1960-1988) _____	53
12: Carte des précipitations moyennes annuelles (1960-1988) _____	54
13: Carte des précipitations moyennes journalières (1960-1988) _____	56
14 : Hétérogénéité spatiale du paysage _____	57
15: Carte des différents types de couvert _____	58
16: Carte des différentes zones géologiques _____	60
17: Carte des différentes zones pédologiques _____	61
18: Carte des différents faciès _____	62
19: Carte des différentes unités de paysage _____	64
20: Plantations d'agrumes dans la plaine de Catane _____	65
21: Collines de l'intérieur _____	66
22: Entailles d'érosion _____	67
23: Pâturage dégradé _____	67
24: Paysage fort dégradé dans la région de Centuripe _____	69
25: Cultures en terrasses dans la région de Centuripe _____	69
26: Paysage en bordure de l'Etna _____	70
27: Séquences de flyschs (région de Troina) _____	70
28: Carte des zones d'applicabilité de l'USLE _____	72
29: Zones d'applicabilité de l'USLE _____	73

Liste des tableaux

1: Les types d'érosion hydrique _____	11
2 : Climat de Catane, Sicile, Italie _____	29
3 : Caractéristiques des stations météorologiques _____	34
4: Dates des images TM du capteur Landsat _____	45
5: Statistiques des données d'altitude _____	48
6: Statistiques des classes de pentes _____	52
7: Statistiques des zones géologiques _____	59
8: Caractéristiques des unités de paysage _____	63

Liste des annexes

1: Données d'intensités pluviométriques (1960-1988) _____	83
2: Image TM infrarouge du capteur Landsat _____	85

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier le professeur F. Bonn, qui a bien voulu assumer la direction de ce travail et le professeur A. Poulin qui m'a fait le plaisir de co-diriger ce travail. Leur rigueur, leur précieux conseils et leur disponibilité ont été pour moi le meilleur des soutiens.

Dans un deuxième temps, je tiens à adresser ma profonde reconnaissance à M. Sten Folving et M. Maria-Luisa Paracchini, chercheurs à l'EMAP, Institut des Applications Spatiales, Centre Commun de Recherche (CCR) de la Commission Européenne à Ispra, Italie, pour leur collaboration, leur conseils et leur support lors de mon séjour au CCR. Aussi, je tiens à remercier le projet POP Sicilia qui a fourni les données utilisées dans cette étude, le consortium inter-universitaire des laboratoires de télédétection du Québec (COLUTEQ) et le CRSNG du Canada pour leur soutien financier dans le cadre d'un séjour au Centre Commun de Recherche (CCR) de la Commission Européenne à Ispra, Italie et d'une campagne de terrain en avril 1997.

Je tiens également à témoigner ma gratitude à l'ensemble du personnel technique et administratif du CARTEL, qui m'ont offert un aide technique des plus précieux et à M. Philippe Legault, qui, par son apport, a contribué à la finalisation de ce travail.

Finalement, des remerciements affectueux à mes parents, ma sœur Nathalie, mes amis et tout particulièrement Judith pour leur soutien inconditionnel et leurs nombreux encouragements qui ont permis la réussite de ce projet.

1. Introduction

En régions méditerranéennes, l'érosion hydrique est la principale cause de dégradation des sols (Douglas, 1976). Accélérée par l'action anthropique, elle entraîne des dommages écologiques et économiques considérables. Elle a comme conséquence de réduire le potentiel des terres agricoles, d'augmenter l'eutrophisation du milieu aquatique et, suite à l'envasement des barrages et des canaux, de diminuer la capacité des infrastructures hydrauliques et ce depuis des siècles.

C'est l'homme civilisé qui a entraîné le déséquilibre des écosystèmes. Il lui fallait des champs pour ses céréales, des pâturages pour ses troupeaux et du bois comme combustible et comme matériau de construction. Cette utilisation intensive du sol a entraîné la destruction du couvert végétal et a exposé le sol aux actions érosives. Depuis, la mécanisation de l'agriculture, l'industrialisation, la surpopulation, l'urbanisation et le tourisme n'ont pas aidé à la restauration de l'équilibre initial.

En Sicile, cette destruction date du temps des romains. De belles forêts de chênes recouvraient cette grande île de la Méditerranée. En moins d'un siècle, elle est devenue un «grenier à blé» dont on se disputa longtemps la possession (Hureau, 1979). De plus, l'agressivité paysanne à l'égard des arbres a contribué à sa déforestation. Au XVII^e et XIX^e siècle, les gens allaient clandestinement couper du bois pour en faire du charbon de bois (combustible de ces temps), non seulement pour eux, mais aussi pour le vendre à l'île de Malte (Rochefort, 1961).

Ainsi, ces différents gestes posés il y a des siècles et les caractéristiques physiques du milieu ont fait de la Sicile un endroit propice à l'érosion hydrique. La Sicile d'aujourd'hui possède un relief accidenté, un régime pluviométrique irrégulier caractérisé par une alternance de périodes de sécheresse et de pluies torrentielles dévastatrices, des sols peu perméables, une végétation discontinue sensible au ravinement et une forêt affectée par les incendies et le déboisement par l'homme. Il est donc important de se pencher sur le problème d'érosion hydrique si l'on veut préserver le paysage et permettre un usage prolongé du territoire.

1.1. Problématique

La télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG) sont de plus en plus appréciés pour l'étude des phénomènes de surface (Cihlar, 1987 ; Fabbri, 1991 ; Vogt, 1992 ; Valério Filho, 1993, Minacapili, 1996). Au Centre d'Application de Recherche en Télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke et également ailleurs, des études ont démontré l'apport des SIG et de la télédétection pour la modélisation et la cartographie des pertes de sols liées à l'érosion hydrique (Bonn et al, 1994). Ces études ont porté sur l'intégration des paramètres commandant l'érosion des sols à l'aide d'un SIG en utilisant un modèle empirique soit l'équation universelle de pertes de sols (USLE : *Universal Soil Loss Equation*, Wischmeier and Smith, 1978).

Depuis quelques années, les modèles de pertes de sols sont associés aux SIG et à la télédétection. Toutefois, les échelles de perception du phénomène d'érosion (parcelle) et les échelles régionales de la télédétection sont très divergentes. Les lois des pertes de sols établies sur une base parcellaire doivent être extrapolées à des échelles plus englobantes, ce qui entraîne généralement certaines contraintes d'utilisation qui ne sont pas toujours respectées (Chakroun, 1993). Il est vrai qu'avec ces méthodes modernes, on découvre progressivement l'intérêt de la spatialisation des modèles de pertes de sols, de la cartographie pour représenter les résultats des pertes de sols sur de grandes étendues et de la création de scénarios pour les interventions humaines sur le milieu (Bonn, 1998). Par contre, l'hétérogénéité spatiale affecte tous les paramètres des modèles de pertes de sols quand ils sont appliqués à de vastes étendues. L'estimation des pertes de sols sur de grandes étendues se fait difficilement à cause de la diversité spatiale du paysage. Il est donc important d'inciter à la prudence vis-à-vis de la régionalisation trop rapide des modèles de pertes de sols (Bonn, 1998).

En milieu méditerranéen, le paysage est complexe. Il se compose d'une mosaïque d'unités de paysage dont chaque famille d'unités peut réagir différemment aux actions érosives de l'eau. Alors, pour être en mesure de spatialiser les pertes de sols à l'aide d'un modèle de pertes de sols à l'échelle d'un vaste bassin versant (plus de

1 000 km²), il serait avantageux de représenter la diversité spatiale du paysage en fonction des risques d'érosion en utilisant la cartographie écologique couplée aux SIG et à l'imagerie satellitaire. La cartographie écologique permet de caractériser l'organisation spatiale des composantes du milieu naturel. La création d'un modèle cartographique à l'aide de ces outils cherche à mettre en évidence une mosaïque d'unités de paysage selon des critères géographiques (type de relief, nature des dépôts de surface, nature du substratum rocheux et type de végétation) sur lesquels il est possible ou impossible d'appliquer l'USLE. L'analyse du paysage à travers les conditions du modèle USLE pourrait permettre d'extrapoler les résultats de pertes de sols à des échelles plus petites. De plus, la classification des paysages selon le concept de la cartographie écologique va permettre de mieux comprendre la complexité de ce type de paysage.

Cette étude consiste donc à développer une méthode pour la gestion des paysages érodés à l'échelle de la région. Elle fournit une synthèse portant sur les caractéristiques physiques d'unités de paysage. Elle offre une vision qualitative dans un programme de conservation des sols.

2. Érosion hydrique

2.1. Formes et processus

L'érosion hydrique est un phénomène dynamique qui contribue, sous l'action de l'eau, à transformer les formes de relief comme les sommets et les rebords de plateaux, les talus, les terrasses, les versants. Ces modifications s'effectuent selon différents processus, soit l'ablation de la matière par l'effet des précipitations, leur transport par les eaux de ruissellement et l'accumulation de cette matière arrachée.

La pluie est la plus importante énergie causant le détachement des particules du sol (Derruau, 1988). Elle est plus que de l'eau. Elle est de l'eau additionnée à une énergie cinétique (Ellison, 1952). La chute des gouttes de pluie provoque la destruction des agrégats du sol, détache et transporte les particules et entraîne le compactage de la surface du sol. Ce phénomène appelé le battage réduit la capacité d'absorption du sol et augmente le ruissellement (Beasley, 1972).

Le sol ainsi arraché par l'effet de la pluie est ensuite transporté dans le sens de la pente par les eaux de ruissellement. Le ruissellement représente l'écoulement superficiel des eaux de pluie. Il peut être de plus en plus concentré, érodant le sol sous diverses formes (Anys, 1991). En effet, le ruissellement pluvial s'opère d'abord en filets ou en nappes avant de se concentrer en rigoles et en ravins (tableau 1). Ces différentes formes d'érosion peuvent également se produire sous la surface du sol. Un réseau souterrain de rigoles peut se former sous une couche moins perméable, ce qui peut entraîner la création de ravins (*suffusion*). Il y a également les mouvements de masse (*solifluction*) qui consistent en une perte de matériel dû à la force de gravité (Barrow, 1991).

L'érosion hydrique se définit donc selon ses formes (érosion en nappes, en rigoles, en ravins) et ses processus (érosion, transport et sédimentation) dont les manifestations et l'intensité varient considérablement dans le temps et dans l'espace.

Tableau 1: Les types d'érosion hydrique

Érosion en nappes (*sheet erosion*)

Les eaux de ruissellement enlèvent les particules fines et superficielles du sol de façon lente et insidieuse. Elle consiste en un lessivage du sol sans que ce processus provoque d'incisions (Derruau, 1988). Ce lessivage a comme effet d'enlever la matière organique et les éléments nutritifs des sols, diminuant leur fertilité et leur production (Beasley, 1972).

Érosion en rigoles (*rill erosion*)

La concentration des eaux de ruissellement morcelle le sol et forme un réseau de rigoles (Barrow, 1991).

Érosion en ravins (*gully erosion*)

D'un degré d'agressivité supérieur aux rigoles, l'érosion en ravins se déclenche lorsque le réseau fluvial devient intense, sur des pentes suffisamment fortes. La prolifération de ce type d'érosion est liée à la dégradation du couvert végétal par l'homme. Elle se combine souvent avec des glissements de terrain sur les flancs de ravins (Derruau, 1988).

La vitesse à laquelle prend place l'érosion des sols dépend d'une variété de facteurs. Ces différents facteurs sont liés aux conditions climatiques (la quantité, l'intensité et la distribution des pluies), la nature du sol et des roches, la physiographie (degré et longueur de pente), l'occupation du sol (le couvert végétal) et les pratiques agricoles. Un changement significatif de l'un de ces facteurs peut augmenter la vitesse de l'érosion (Toy, 1977 in Fabbri, 1991). Les relations entre ces facteurs déterminants et la perte de sol sont complexes. Par exemple, la pente est un facteur important qui contribue à accélérer l'écoulement superficiel des eaux sous la forme de ruissellement et en l'absence de végétation, l'intensité du ruissellement peut être très élevée et provoquer une perte de sol considérable. L'érosion est particulièrement liée à l'inclinaison de la pente, mais elle dépend également de la couverture du sol et de son utilisation, qui sont à leur tour dépendantes de la pente (Neboit, 1990).

Ainsi, selon les climats et les zones physiographiques, les risques d'érosion hydrique varient considérablement. À l'échelle mondiale, les endroits les plus vulnérables à l'érosion hydrique sont les zones semi-arides et semi-humides comme la Chine,

l'Inde, l'ouest des États-Unis, le centre de la Russie et les régions méditerranéennes. Le problème de l'érosion dans ces régions est aggravé par la sensibilité de leurs écosystèmes (Morgan, 1995).

2.2. Notion de risque d'érosion hydrique

La sensibilité du paysage à l'érosion hydrique tient à la fois des conditions naturelles (érosion géologique) et des modalités de l'occupation du sol (érosion anthropique). Ce sont précisément ces dernières qui transforment le milieu. En effet, les modifications du couvert et du drainage agressent le milieu et le rendent vulnérable à toutes manifestations érosives. La mise en culture, les aménagements routiers et urbains libèrent un potentiel érosif qu'il faut contrôler et qui ne l'est pas toujours. Par exemple, les progrès techniques, l'arrivée de nouvelles pratiques agricoles et la monoculture ont entraîné une dégradation du sol en détruisant sa structure, réduisant sa cohésion et sa teneur en matière organique, le rendant plus sensible à l'érosion hydrique (Bonn et al, 1994).

Les risques d'érosion se manifestent donc avec l'exploitation du sol (agriculture) et de la végétation (déforestation) sous diverses formes. Ils croissent avec l'intensité de cette exploitation. C'est sous cet angle que cette recherche sera abordée, car c'est en tant que processus accéléré par l'homme que l'érosion hydrique devient une menace pour l'environnement et le patrimoine pédologique (Dion, 1989).

2.3. Risque d'érosion hydrique en milieu méditerranéen

En région méditerranéenne, la géologie, l'agressivité climatique et la pression anthropique rendent le milieu fragile aux actions de l'érosion hydrique. Effectivement, du IV^e au XIX^e siècle, les pays méditerranéens vécurent des bouleversements qui eurent comme conséquence d'aggraver le déséquilibre des écosystèmes (Demangeot, 1996). Les populations chassées des littoraux par l'insécurité (piraterie et brigandage) se réfugièrent dans les collines de l'intérieur. Ceci a conduit la population agraire à déboiser les zones de montagnes de façon désordonnée, peu importe l'inclinaison des pentes. Il s'en est suivi une dégradation rapide des sols et

un déséquilibre irréversible des écosystèmes. Ainsi, «au XVIII^e, un tiers des surfaces cultivées en Italie méridionale l'était sur des pentes fortes » (Neboit, 1990, p. 4).

Ajouté à cette pression anthropique, un climat rude qui comporte une alternance saisonnière considérée comme une des plus contrastée du monde (Demangeot, 1996) n'aide pas non plus à protéger le paysage. Le climat méditerranéen se caractérise par un été chaud et sec qui a tendance à se prolonger et un hiver froid et humide au cours duquel les précipitations peuvent être d'une grande violence. Ainsi, en cas de destruction, la végétation (garrigue, maquis) souvent basse et de faible densité se régénère difficilement. Les périodes de sécheresses estivales provoquent la fissuration du sol qui dénude et dessèche les racines alors qu'au contraire, en hiver, celles-ci risquent de périr par asphyxie sous les fortes pluies hivernales. En plus, ces fortes précipitations se produisent souvent lorsque les sols sont dépourvus de toute couverture végétale, entraînant une perte de sol considérable. Il y a également les arbres fruitiers et la vigne très répandus en milieu méditerranéen qui constituent des cultures à risques dans le domaine de l'érosion hydrique étant donné leur surface importante de sol nu. Il faut aussi faire mention de la minceur, de la discontinuité et de la mauvaise structure du sol qui l'empêche de bien absorber l'eau, le rendant vulnérable aux actions des eaux de ruissellement. Également, là où la teneur en argile est relativement forte, il y a souvent un effet de glaçage, causé par un contenu élevé en sels, bloquant l'infiltration. Ainsi, le ruissellement peut être élevé et provoquer des transports de sédiments importants, soit près de 15 tons/ha sur plus du tiers du bassin méditerranéen (Hill et *al*, 1994).

Le ruissellement est donc relativement important en milieu méditerranéen. Il est la source d'alimentation principale des différents réseaux hydrographiques. Il peut être très intense. Il le doit à la force des averses, à la faiblesse de la couverture végétale, aux propriétés des sols (phénomène de glaçage) ou à l'absence des sols (Tricart, 1969). Une mise en culture peu soignée ou un pâturage excessif peut déclencher des ravinements. De plus, si les conditions lithologiques (fertilité insuffisante) ou climatiques (saisons sèches accentuées) empêchent la régénération de la végétation après l'abandon des cultures, les mauvaises terres se développent (Tricart, 1969).

En plus des fortes précipitations et de la vitesse d'infiltration dans le sol, la topographie joue un rôle dans le mécanisme de ruissellement sous le climat méditerranéen. Le ruissellement est étroitement dépendant du relief et s'organise essentiellement en fonction de lui. Le ruissellement est fort sur les reliefs accidentés et diminue à leur pied. En effet, la vitesse de ruissellement baisse rapidement du fait que les eaux s'étalent et, allant moins vite, s'évaporent et disparaissent par absorption dans le substrat (Tricart, 1969).

Ainsi, en domaine méditerranéen, le ruissellement que les pluies alimentent et les eaux courantes qui descendent les pentes sont à l'origine des importantes pertes de sols (Neboit , 1990). Les entailles d'érosion que dessinent les rigoles sur des pentes fortes sont très caractéristiques des grands versants labourés des régions méditerranéennes.

3. Modélisation des processus d'érosion

3.1. Modèles de pertes de sols

L'avancement des connaissances des différents mécanismes liés à l'érosion hydrique s'est effectuée grâce à la modélisation. En effet, la mise au point de modèles reliant les quantités de sols recueillies en aval des zones de processus aux facteurs responsables de ces pertes a permis d'acquérir une connaissance plus exacte des mécanismes de dégradation des sols par l'eau. Ces modèles de pertes de sols offrent des outils de simulation intéressants pour évaluer les risques d'érosion et identifier par le fait même les mesures adéquates pour contrer ces risques (Company-Redmond, 1996).

Il existe deux approches pour élaborer un modèle d'érosion qui aboutissent à deux types de modèles : les modèles empiriques comme l'USLE et le SLEMSA et les modèles physiques comme CREAMS, ANSWERS, WEPP et le SEMMED.

3.1.1. Modèles empiriques

Les modèles empiriques consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observations et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué de façon expérimentale en ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont été créés pour jouer un rôle opérationnel, c'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de contrôle de l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996, p.39). Le modèle le plus simple est celui de type boîte noire. Il relie la perte de sédiments soit aux précipitations, soit au ruissellement (Morgan, 1995).

En ce qui concerne la modélisation empirique, l'exemple le plus connu est celui des travaux menés par Wischmeier et Smith (1958) sur plus de 10 000 parcelles expérimentales dans 24 états à travers les États-Unis et qui ont mené à la proposition d'un modèle universel de pertes de sols connu sous le nom d'USLE (USLE : *universal soil loss equation*, Wischmeier et Smith, 1978).

3.1.2. Modèles physiques

Depuis quelques années, grâce à une connaissance plus approfondie des mécanismes de l'érosion hydrique, de nouveaux besoins sont apparus. Des efforts ont été faits pour développer des modèles qui peuvent prédire la distribution spatiale du ruissellement et des sédiments à l'échelle de l'événement (Morgan, 1995). Ainsi, des modèles basés sur les aspects physiques du processus d'érosion ont été mis au point. Ces modèles utilisent également des équations mathématiques pour reproduire le processus d'érosion hydrique en formulant leurs différentes étapes physiques (Company-Redmond, 1996).

Il existe plusieurs modèles récemment développés basés sur les aspects physiques du processus d'érosion. Il y a le modèle ANSWERS (*Areal Non point Source Watershed Environmental Response Simulation*, Beasley, Huggins and Monke, 1982) créé pour simuler le comportement érosif et hydrologique d'une petite parcelle agricole durant et immédiatement après un événement pluvieux. Lors de sa création, il était considéré comme un des modèles le plus complet. Il a même été combiné à un SIG (De Roo et al, 1989).

Depuis, d'autres modèles de type physique ont été développés (Morgan, 1995) :

- ◆ le modèle CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) a été développé aux Etats-Unis pour des études à l'échelle de la parcelle ;
- ◆ le modèle WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) est un autre grand projet développé aux Etats-Unis désigné pour remplacer l'USLE ;
- ◆ le modèle SEMMED (*Soil Erosion Model for MEDiterranean areas*, De Jong, 1994) a été conçu du côté européen. Ce modèle a été associé aux SIG et à la télédétection.

3.2. Intégration d'une dimension spatiale et temporelle

De plus en plus, on cherche à intégrer la variabilité spatiale et temporelle aux modèles de pertes de sols. La notion d'espace et de temps peut être d'une grande utilité dans le cadre d'un programme d'aménagement et de conservation des sols. Par exemple, pour donner la priorité aux zones urgentes d'intervention, la cartographie des pertes des sols devient nécessaire.

L'intégration des notions spatiale et temporelle dans la modélisation des pertes de sols implique une énorme quantité de données à gérer. Antérieurement, la prédiction des pertes de sols à des petites échelles dépendait de la dérivation manuelle des données topographiques et des différentes informations sur l'occupation du sol. L'avènement des SIG, de la télédétection et des produits dérivés (MNT) a permis d'améliorer cette lacune.

Les SIG sont des outils de base de données spatiales. Ils permettent de traiter et d'analyser des données de sources hétérogènes grâce aux opérations d'analyses spatiales présentes dans un SIG (Company-Redmond, 1996). L'intérêt d'associer cet outil aux modèles d'érosion se situe au niveau de la détermination de certains paramètres et les fonctions de superposition de cartes matricielles permettent d'effectuer la modélisation au sein du SIG.

L'apport de la télédétection se situe au niveau de l'acquisition d'information sur les états de surfaces en offrant une vision globale sur la nature du sol et son occupation. Les propriétés spatiales et temporelles des données satellitaires sont des atouts très appréciés pour les études régionales sur l'érosion hydrique. En effet, elles permettent une régionalisation et une mise à jour plus rapide des paramètres décrivant les surfaces et ce à plus faible coût comparé aux techniques traditionnelles d'enquêtes sur le terrain. L'utilisation de la télédétection est reconnue comme un des outils le mieux adapté aux études régionales dans le domaine de l'érosion, son apport à l'étude des phénomènes de surface n'est plus à démontrer (Anys, 1991 ; Fabbri, 1991 ; Vogt et Gomer, 1992 ; Chackroun, 1993 ; Bonn et *al.*, 1994 ; Hill et *al.*, 1994 ; De Jong, 1996).

Le modèle de perte de sol le plus souvent associé à la télédétection et intégré aux SIG est le modèle USLE. L'utilisation des données satellitaires pour la détermination du facteur C lié à la couverture végétale a été démontrée à quelques reprises (Anys, 1991, Chakroun, 1993). L'USLE couplée à ces outils, permet, en utilisant l'ensemble des facteurs de base de l'érosion hydrique, d'effectuer la cartographie, sur de grandes étendues, des zones homogènes de pertes en sol. Néanmoins, il faut demeurer prudent, l'utilisation de l'USLE sur de grandes étendues peut délivrer des résultats de pertes de sols abusifs, car trop imprécis (Company-Redmond, 1996)

3.3. Choix d'un modèle

Avant d'aborder le choix d'un modèle, il faut prendre note que les recherches effectuées pour l'étude des phénomènes de surface visent généralement la mise en place de mesures efficaces pour contrer les risques. Que ces études soient basées sur la mise en place de protocole de mesures quantitatives ou qualitatives de l'érosion, ou bien sur une modélisation, les précipitations, le sol, la végétation, la morphologie du site et l'action de l'homme doivent être pris en compte (Company-Redmond, 1996).

La modélisation des pertes de sols dépend de l'applicabilité et de la précision du modèle utilisé. Généralement, un modèle de pertes de sols doit simuler le processus d'érosion le plus précisément possible et donner des résultats plausibles pour les événements extrêmes (Morgan, 1995).

La réalité est tout autre, car ceci implique que le modèle doit être applicable autant sur des surfaces naturelles que des surfaces travaillées, sur de la végétation herbacée que de la végétation arbustive, sur des pentes faibles que sur des pentes fortes et lors d'événements pluvieux normaux ou extrêmes. Malheureusement, la plupart des modèles entrent en conflit avec l'une ou l'autre de ces conditions. Il est donc important de déterminer clairement les objectifs et les limites du modèle utilisé, les processus d'érosion et les conditions du milieu avant chaque utilisation d'un modèle (Morgan, 1995).

3.4. Modèle de pertes de sols USLE

3.4.1. Pourquoi l'USLE

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de maintenir le modèle USLE pour différentes raisons. Étant donné que le travail entourant l'élaboration de l'USLE s'est effectué sur plus de 10 000 parcelles expérimentales dans 24 états à travers les États-Unis, les limites de ce modèle sont bien identifiées dans la littérature. De plus, ce modèle est facilement adaptable aux données multisources (images satellitaires, modèle numérique d'altitude (MNA)), ce qui est utile pour effectuer une spatialisation des données physiographiques sur de vastes étendues. À plusieurs reprises, l'USLE a été appliqué à des petites échelles en utilisant les SIG et la télédétection. Finalement, l'USLE s'adapte bien à une approche géomatique. Les facteurs de l'équation peuvent représenter chacun une couche d'information dans le SIG et permettre une cartographie des pertes de sols (Dion, 1989 ; Anys, 1991 ; Fabbri, 1991 ; Chackroun, 1993).

3.4.2. USLE : équation universelle de pertes de sols

Afin d'évaluer l'intensité de l'érosion des sols l'*United States Department of Agriculture* (U.S.D.A) a mis au point l'équation universelle de pertes de sols (USLE). L'équation se compose de six facteurs simples relatifs à la sensibilité érosive du sol, l'agressivité érosive de la pluie, et les caractéristiques de longueur et le degré de la pente :

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

où

A = la perte de sol en tonnes par acre par an,

R = le facteur d'érosivité de la pluie

K = le facteur d'érodibilité du sol,

L = le facteur de l'érosivité relative à la longueur de la pente,

S = le facteur de l'érosivité relative à l'inclinaison de la pente,

C = le facteur d'érosivité relative du couvert végétal ou de l'occupation du sol,

P = le facteur de réduction de la perte de sol due à des pratiques de conservation du sol.

L'USLE est encore le modèle de base de plusieurs recherches de modélisation du détachement des particules. Certains des facteurs du modèle ANSWERS sont les mêmes que ceux de l'USLE (Company-Redmond, 1996). L'USLE demeure donc le modèle le plus utilisé pour une estimation globale des pertes de sols liées à l'érosion hydrique.

3.4.3. Limites de confiance de l'USLE

Étant donné que l'USLE a été utilisée à maintes reprises ses limites sont bien définies dans la littérature. Elles se définissent comme suit :

3.4.3.1. Limite topographique

Les différentes formules sur la longueur et le degré de pente ont été dérivées d'expérimentations effectuées sur des pentes de moins de 18 % et des longueurs de pente de moins de 270 pieds (100 m). Ainsi, l'application de l'USLE sur des pentes de plus de 18% et d'une longueur de plus de 100 m peut fausser les résultats (Wischmeier, 1976). L'extrapolation de ces formules sur des pentes qui excèdent ces dimensions ne seront qu'une simple spéculation. RUSLE (Revised Universal Soil loss Equation, Renard et al, 1994) qui est une version révisée de l'USLE permet d'estimer les pertes de sols sur des pentes de plus de 20 %. Par contre, nous nous en tiendrons aux limites topographiques de l'USLE. Les autres modèles de pertes de sols n'ont pas été suffisamment mis à l'épreuve pour définir clairement leurs limites.

3.4.3.2. Limite spatiale

F. Dion (1989) définit la perte de sol comme étant la quantité de sédiments mis en disponibilité par l'érosion du sol et évacués hors d'une unité physiographique homogène. Ainsi, pour estimer correctement la perte de sol, il importe de respecter

l'unité élémentaire qui est le champ. À l'échelle d'un bassin versant ou d'un sous-bassin, il devient difficile d'analyser les conditions de chaque champ. Ceci oblige donc à généraliser fortement. Les moyens classiques utilisés sur des parcelles ne permettent pas une modélisation sur de vastes étendues, toutefois maintes recherches ont tenté de modéliser les pertes de sols à des échelles régionales et même à l'échelle nationale. Des études à l'échelle du continent effectuant la cartographie des pertes de sols témoignent de ces difficultés (Lal, 1988). Les résultats qu'on y retrouve sont généralisés et diffèrent considérablement d'une étude à l'autre. En conséquence, la perte de sol devient un simple indice de l'intensité de l'érosion hydrique que subit chaque unité homogène qui compose la région, le pays ou même le continent.

3.4.3.3. Limite par rapport au mécanisme d'érosion

Les limitations de ce modèle se situent également au niveau du mécanisme d'érosion. Premièrement, le résultat de perte de sol obtenu correspond au taux d'arrachement et ne tient pas compte du phénomène de transport et de sédimentation. De plus, l'érosion concentrée et l'érosion diffuse restent encore regroupées. L'USLE exclut généralement l'érosion en ravins. (Wishmeier, 1976).

En bref, cet outil de gestion des sols est simple à appliquer sur des terrains uniformes, mais l'utilisation de l'USLE devient complexe sur des pentes irrégulières ou à l'échelle régionale. À l'échelle d'un vaste bassin versant comportant diverses inclinaisons et longueurs de pente, divers types de sols et d'utilisation du sol, il devient difficile à appliquer. Ainsi, la prudence est de mise lorsque nous désirons appliquer l'USLE sur de vastes bassins versants où il y a présence de paysages complexes.

4. Cartographie écologique

4.1. Approche cartographique

La cartographie est un support intéressant pour visualiser des données spatio-temporelles. Elle permet d'explorer les données et de faire de l'analyse spatiale. Sans oublier que la carte est un moyen de communication très intéressant. En effet, la carte exprime les choses plus aisément que le texte. Elle permet de découvrir des relations multiples que seule une exploration statistique longue et complexe peut mettre en évidence. Ainsi, l'étude des paysages par la cartographie est une approche intéressante qui permet de traiter l'information au même titre que la statistique (Ozenda, 1986).

4.2. Approche écologique

4.2.1. Qu'est ce que l'écologie ?

Tout d'abord, qu'est-ce que l'écologie ? La plupart des gens l'associent à l'environnement. Il semblerait qu'avant les années 1960, quelques-uns d'entre eux n'auraient même pas su quoi répondre. C'est la popularité des mouvements environnementaux qui a propulsé l'écologie à l'avant scène.

L'auteur du terme, Ernst Haeckel a défini l'écologie comme l'étude des connaissances concernant l'économie de la nature (Smith, 1990). Depuis, les écologistes ont tenté de définir ce terme. D'après Smith (1990), aucune de ces définitions n'est satisfaisante, car elles sont soit trop restrictives ou trop larges.

Il est important de définir quelques principes pour introduire un sujet. Par contre, dans le cas de cette étude, nous avons besoin de définir l'écologie pour comprendre le concept d'analyse écologique et savoir l'intégrer à une étude de modélisation des pertes de sols. L'écologie est donc au sens large :

« *The study of structure and function of nature* » (Odum, 1971, p. 3)

Elle a sa raison d'être si elle nous aide à résoudre un problème environnemental et/ou d'aménagement des ressources naturelles. En effet, «elle peut et doit être une science permettant d'orienter le développement pour optimiser le capital-nature» (Jurdant et *al*, 1975, p. 2). Ce sont les interactions entre les ressources naturelles du territoire qui sont à l'origine de la plupart des conflits d'utilisation de l'espace, lesquels entraînent malheureusement des problèmes de dégradation de l'environnement.

L'utilisation d'une approche écologique offre une vision qualitative qui est une première approche très intéressante. Elle peut s'avérer d'une grande utilité pour l'étude des phénomènes de surface. L'utilisation d'une telle approche lors de l'applicabilité des modèles de pertes de sols peut éviter des erreurs lors de l'estimation des pertes de sols. La connaissance des écosystèmes avant toute application permet d'identifier des sites représentatifs du territoire à l'étude et donc de transférer les résultats à des échelles plus englobantes.

4.3. Cartographie des unités écologiques

Dans un cadre écologique, la cartographie devient un outil intéressant pour analyser les structures naturelles du paysage. Ce qui nous mène à parler de *cartographie des unités écologiques*. Celle-ci consiste en une subdivision de l'espace en territoires écologiques, c'est-à-dire «en unités identifiées, caractérisées et nommées par les composantes bio-physiques de l'environnement qui reflètent le mieux les perspectives d'utilisation du milieu naturel» (Jurdant et *al*, 1975, p. 1).

La cartographie écologique est donc un système de classification du territoire qui met en évidence des unités de paysage. Celle-ci se définit comme une entité homogène caractérisée par des ensembles physiographiques, géologiques et géomorphologiques où varient la végétation, le climat et les éléments anthropiques (figure 1).

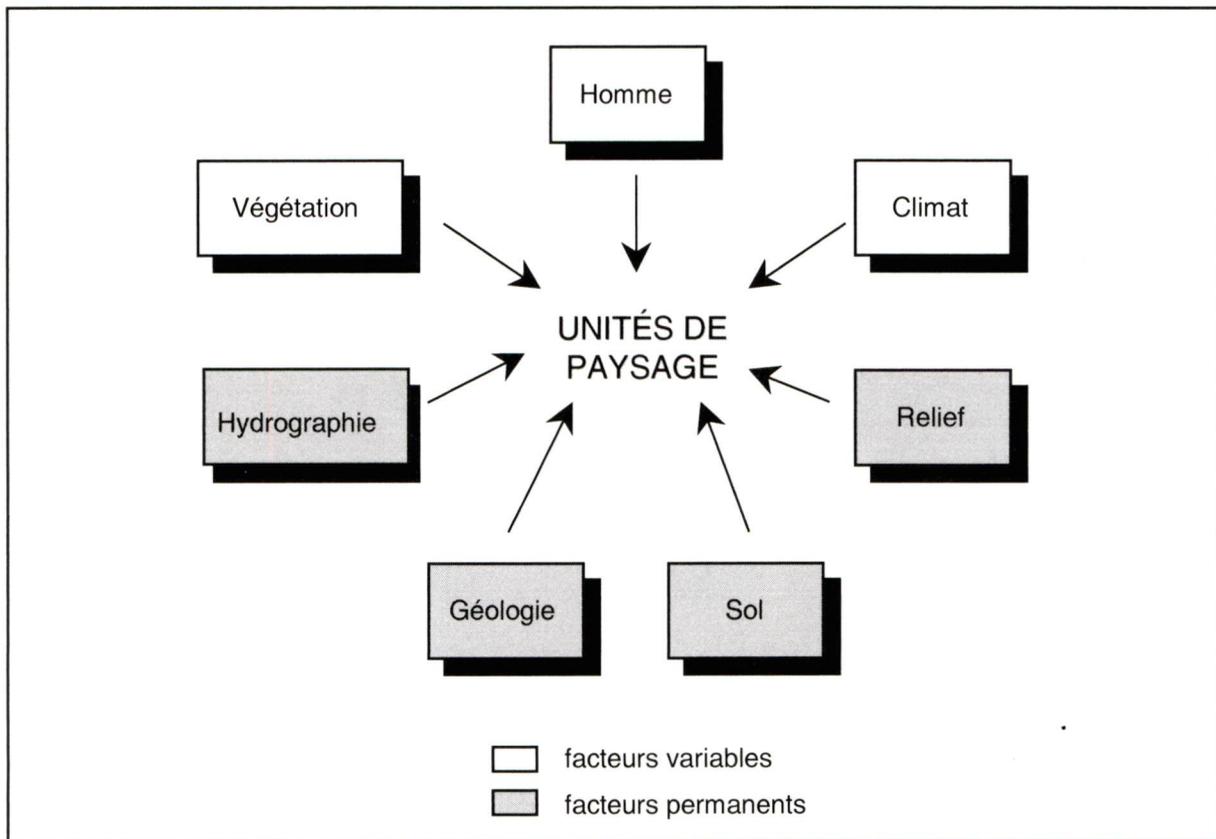


Figure 1: Unités de paysage basé sur le modèle de paysage dans un contexte écologique de Zonneveld, 1972.

4.3.1. Niveau de perception

Un paysage représente une combinaison dynamique et instable d'éléments en réaction les uns avec les autres dans un espace géographique (Tricart, 1969). Ainsi, une unité de paysage peut être classée en différentes échelles de perceptions. Il existe différents niveaux d'organisation du territoire (le champ, le bassin versant, la région, le pays). La cartographie écologique à ces différentes échelles doit donner une image aussi détaillée que possible, mais globale, de l'entité territoriale concernée (Jurdant et al, 1975).

Le choix d'une échelle est donc important, sinon il y a des risques de fournir à l'aménagiste un document trop détaillé ou bien trop large. Alors, lorsqu'on désire effectuer la cartographie écologique d'un territoire donné, il est nécessaire de tenir compte de la nature de l'information requise, du niveau de précision requis pour cette information, de la superficie du territoire, du temps alloué pour effectuer le travail, de

la complexité écologique du territoire et de l'information écologique existante pour le territoire (Jurdant et *al*, 1975).

Dans le cas de notre étude, l'échelle est dépendante de la superficie du site d'étude qui consiste en un vaste bassin versant et de la résolution des données satellitaires utilisées. À cette échelle (km²), il est donc possible d'identifier des portions de territoires qui se distinguent les unes des autres selon les caractéristiques suivantes :

- ⇒ la pluviométrie,
- ⇒ le type de relief,
- ⇒ la nature et la distribution des dépôts de surface,
- ⇒ la nature du substratum rocheux (roc),
- ⇒ l'importance et le type de réseau hydrographique,
- ⇒ et le type de couvert.

La réalisation d'un tel inventaire écologique de l'espace offre aux aménagistes un document portant sur les ressources et leur potentiel et peut être employé pour la gestion des ressources naturelles dans une perspective de conservation. En effet, la carte des unités écologiques est un document intéressant par sa valeur de synthèse. Elle s'intègre bien dans une étude d'érosion hydrique. Elle peut être utilisée comme outil de planification, c'est à dire «comme première approche du milieu pour connaître les contraintes et potentiels d'une région ou encore pour la préparation d'études d'impacts détaillées» (Robitaille, 1990, p. 7).

5. Cadre général de l'étude

5.1. Hypothèses de recherche

Cette étude comporte deux hypothèses de recherches qui sont les suivantes :

1. Les modèles de pertes de sols sont difficilement applicables sur des petites échelles en milieu hétérogène.
2. L'application d'un modèle de pertes de sols sur des paysages complexes requiert une définition du paysage en zones homogènes dont les attributs respectent les limites du modèle.

5.2. Objectifs de recherche

Cette étude vise à mettre en évidence une mosaïque d'unités de paysage selon des critères lithologiques, pédologiques, topographiques et pluviométriques sur lesquels il est possible d'appliquer l'USLE.

Quant aux objectifs spécifiques, ils peuvent être énumérés comme suit :

- ◆ Construire une base de données sous la thématique de l'érosion hydrique dans un SIG.
- ◆ Identifier des unités de paysage selon les caractéristiques physiques du territoire.
- ◆ Localiser les zones où il est possible d'appliquer l'USLE.

5.3. Site d'étude : le Simeto en Sicile, Italie.

5.3.1. La Sicile : localisation et description générale

Tour à tour sombre et lumineuse, violente et douce, aride et riante, la Sicile, forte de son patrimoine culturel exceptionnel, s'ingénie à déjouer les idées reçues. (Girbas, 1997, p. 95)

La Sicile est une île italienne (figure 2). Elle est séparée de l'Italie par le détroit de Messine. Elle a une superficie de 25 708 km² et une population de près de 5 millions d'habitants. La Sicile est donc la plus grande et la plus peuplée des îles de la Méditerranée (la Sardaigne : 20 090 km² et 1 582 115 habitants ; la Corse : 8 720 km² et 260 000 habitants, Crète : 8 720 km² et 502 000 habitants). Par contre, ce ne fait pas d'elle la plus densément peuplée (Chypre : 951 km² et 679 000 habitants ; Malte : 316 km² et 355 000 habitants).



Figure 2 : Carte de l'Italie

La Sicile se divise en neuf provinces, au découpage difficile né de la complexité des fiefs et des baronnies d'autrefois. La Sicile a longtemps été compartimentée en fiefs ce qui a créé une société agraire particulièrement fermée et strictement hiérarchisée entre les puissants *barone* et les humbles *contadini* étrangers aux besoins des Siciliens (Hureau, 1979). Certaines de ces provinces ont même été appauvries par le brigandage et la *mafia* jusque dans les années 1940-50. De plus, on a observé une émigration importante depuis des décennies dû à une croissance de la population

trop élevée pour les ressources de l'île. Ainsi, cette île prospère de l'Antiquité figurait encore dernièrement parmi les régions pauvres de la Méditerranée.

Il y a deux Siciles : les régions littorales et l'intérieur. Le littoral est la région prospère de la Sicile. C'est le long du littoral que l'on retrouve les cultures intensives d'agrumes. Le climat y est plus doux et l'eau plus accessible par irrigation. Tandis que l'intérieur, c'est le pays des grands champs de blé et des pâturages. Le climat est plus rude. Les pluies s'évaporent rapidement. La sécheresse a imposé une vie agricole de steppe. Vidal de la Blache et Gallois (1934) ont déjà décrit ces régions de grands pays muets, nus, austères, d'une vie plus archaïque.

Ainsi, les grandes villes importantes (Palerme, Catane, Syracuse) sont situées le long du littoral. Cette région est plus densément peuplée que les régions intérieures. La population a été attirée par les grands ports, la pêche étant une ressource non négligeable et les cultures arborescentes économiquement plus rentables que le blé et les moutons. À l'intérieur, la population vit également dans les villes qui sont en majorité situées au haut des pitons rocheux. En effet, le passé d'insécurité et de paludisme présent dans les grandes plaines ont entraîné la population à se regrouper dans les zones plus élevées de l'île.

En Sicile, il y a également l'exploration du sous-sol : gypse, soufre, gaz naturel et pétrole. Ajoutons que l'industrie touristique, grâce aux richesses archéologiques et à la beauté du paysage, y est importante.

5.3.2. Caractéristiques physiques

Au niveau physiographique, la Sicile a une altitude moyenne relativement forte dû à l'intensité du soulèvement quaternaire (441 m, près des 2 tiers de la surface dépassent 300 m). Les plaines sont rares, seulement 6,8 % du territoire (Hureau, 1979).

Vidal de la Blache et Gallois (1934) ont comparé l'île de la Sicile à une collection d'échantillons géologiques et topographiques. En effet, les caractéristiques physiques du réseau hydrographique, du relief, des sols et de la végétation sont contrôlées par

le substrat rocheux en place. Les traits généraux de cette région sont nuancés par une foule d'inégalités dans le soulèvement et la résistance des roches. L'érosion a souvent dégagé les couches dures cachées sous des sédiments plus récents. On aperçoit des signes de rajeunissement dans le paysage : encaissement des rivières dans les roches dures, confusion du réseau hydrographique où l'on devine plusieurs captures récentes ou prochaines. Sous une petite carapace de calcaire, de marno-calcaire, de craie, de gypse, c'est souvent l'argile qui affleure pour laisser voir des traces de ravinement. Ces glaises si répandues glissent continuellement, emportant champs et chemins. En Sicile, 40 % de la surface de l'île est considéré comme sujet à des *franes* (glissement de terrain) fréquentes, et 30 % comme peu fermes, ce qui constitue une des plaies de la Sicile (Hureau, 1979).

Un autre trait de caractère de la Sicile est le climat (tableau 2). Cette région est typique du climat méditerranéen. Il y a une alternance saisonnière très contrastée. En hiver, il y a des pluies froides, parfois très violentes, causées par la coïncidence d'une pluie froide et d'une température fraîche. En été, au contraire, les hautes pressions subtropicales imposent une aridité qualifiée de désertique (Demangeot, 1996).

Tableau 2 : Climat de Catane, Sicile, Italie (lat. 37°N) (Demangeot, 1996)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	An
Temp. (°C)	10,5	11,0	12,7	15,7	19,6	23,9	26,8	27,1	24,5	19,9	16,2	11,8	18,3
Préc. (mm)	89,5	75,4	90,9	45,2	12,1	4,9	6,6	7,7	27,7	52,8	65,6	104,1	582

5.3.3. Le Simeto : localisation

Le site choisi pour effectuer cette étude est le vaste bassin versant du Simeto (figure 3). Ce bassin, d'une superficie de 4 177 km², possède une richesse de paysage très représentative de la Sicile. Il est situé à l'extrémité est de la Sicile dans la province de Catania et d'Enna. Le bassin est compris approximativement entre les longitudes 14° 19' et 15° 6' est et les latitudes 37° 10' et 37° 55' nord.

Étant donné que cette recherche vise à classer le paysage, une description plus approfondie des différentes caractéristiques physiques du bassin versant du Simeto est présentée à la section sept, dans le cadre de la présentation et de l'analyse des résultats.

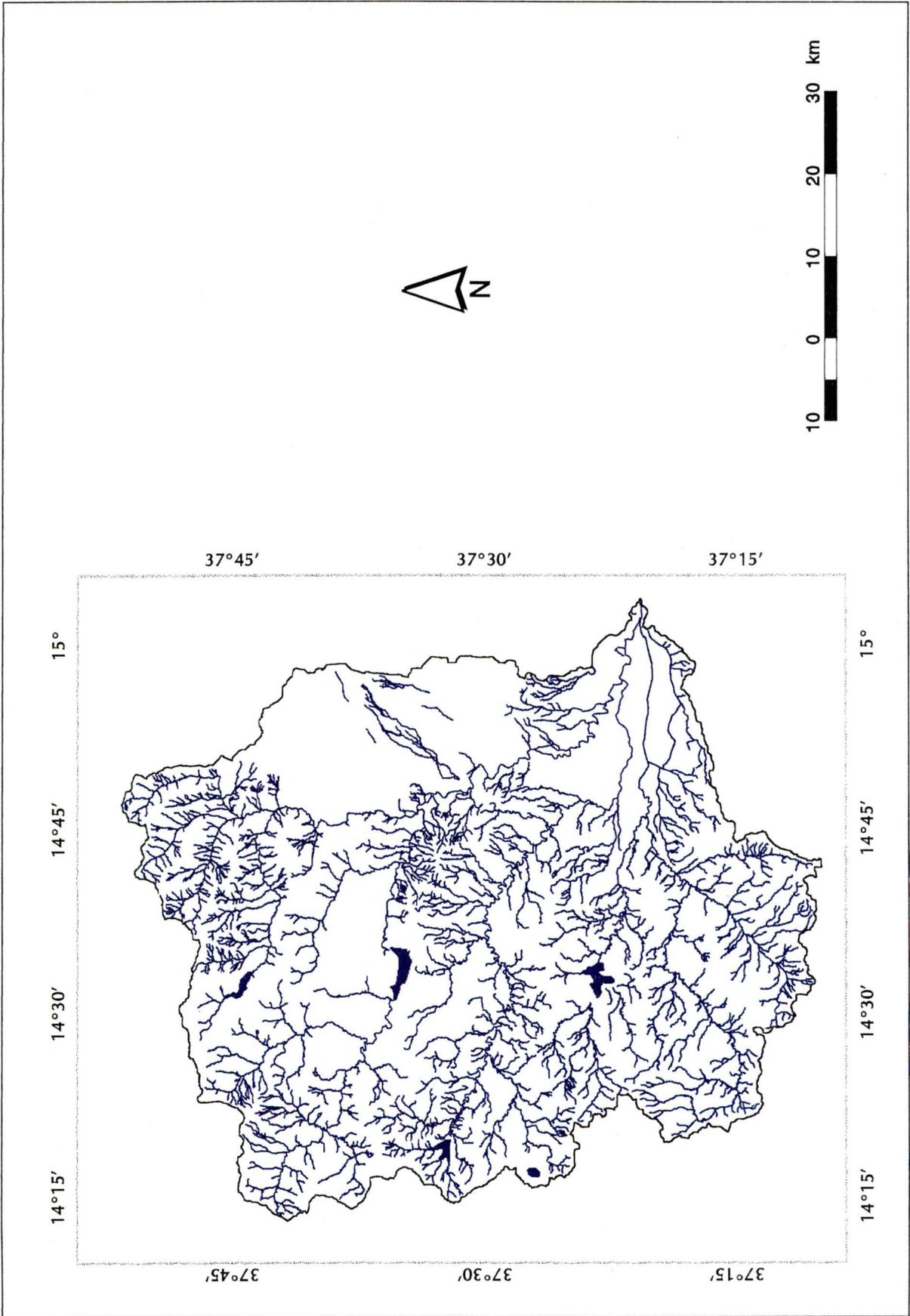


Figure 3: Réseau hydrographique du Simeto

réalisée par: Annie Clark

6. Intégration et représentation dans un SIG

La première partie de cette étude consiste à créer, dans un cadre écologique, un modèle cartographique dans un SIG afin de réaliser une carte d'unités de paysage selon des critères lithologiques, pédologiques, physiographiques, pluviométriques et d'occupation du sol sur lesquels il est possible ou non possible d'appliquer l'USLE (figure 4).

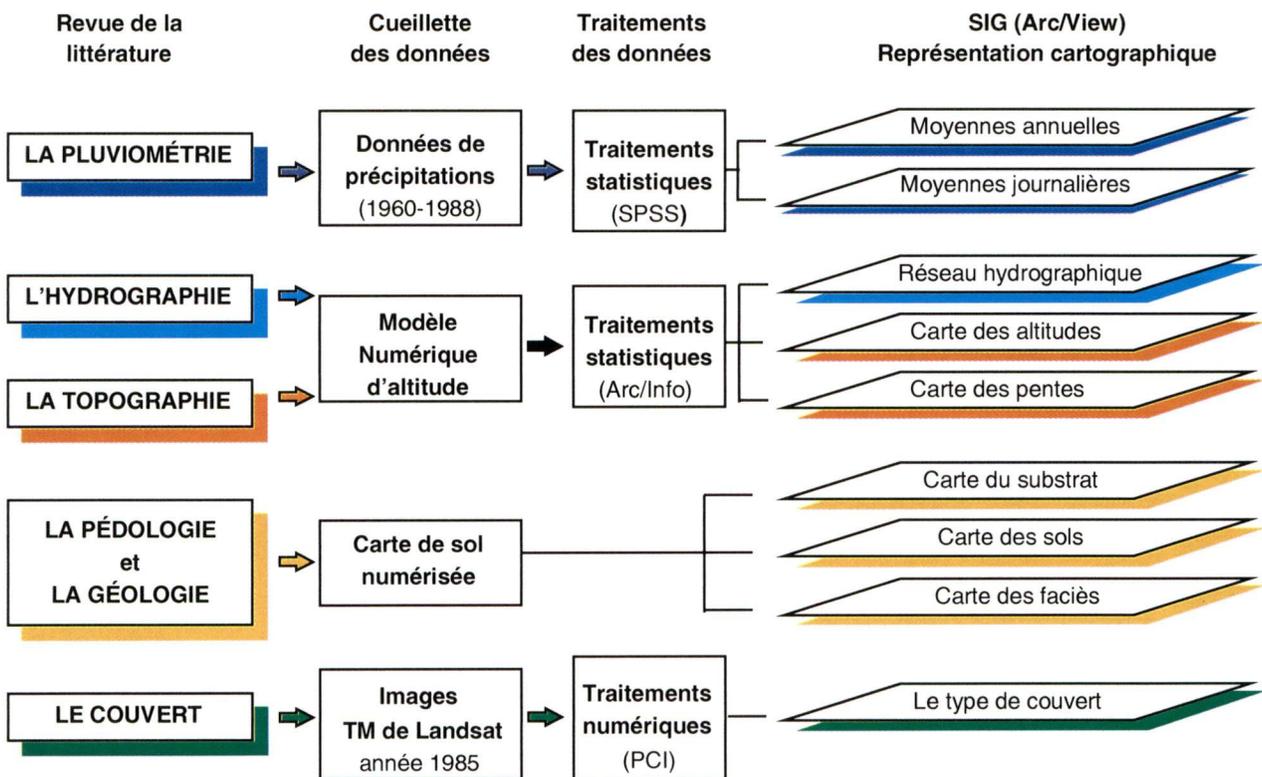


Figure 4: Étapes méthodologiques: intégration et représentation dans un SIG

Afin de réaliser un modèle cartographique dans un SIG, on a besoin d'une base de données à références spatiales contenant les informations quantitatives et qualitatives sur la physiographie, la géologie, la pédologie, la pluviométrie et le type de couvert. Pour assembler cette base de données, nous avons recueilli des données de départ provenant de sources ponctuelles ou spatialisées. Ces données recueillies ont subi des traitements statistiques et numériques dans différents logiciels pour être ensuite intégrées dans le SIG Arc/Info où elles ont été analysées et

représentées à l'aide du SIG ArcView. De cette façon, une série de cartes a été produite représentant les conditions pluviométriques, le type de relief, la nature et la distribution des dépôts de surface, la nature du substratum rocheux, l'importance et le type de réseau hydrographique et le type de couvert.

6.1. Données recueillies pour la réalisation de l'étude

Une cueillette de données a été réalisée lors d'un séjour de six mois au Centre Commun de Recherche (CCR) de la Communauté Européenne (CE) à Ispra, Italie et une campagne de terrain a eu lieu à la fin avril 1997. Les données recueillies proviennent des sources suivantes :

1. la base de données agro-météorologique HYDRE,
2. la carte des sols de la Sicile au 1 : 250 000,
3. la carte géologique de l'Italie au 1 : 1 000 000,
4. les cartes topographiques au 1 : 50 000 (Institut géographique militaire italien, IGMI),
5. un modèle numérique d'altitude (Institut géographique militaire italien, IGMI),
6. six images TM du capteur Landsat (scène 188/34 et 189/34),
7. diverses études et rapports de recherche.

6.2. Outils utilisés pour la réalisation de l'étude

- ◆ Les systèmes d'informations géographiques Arc/Info version 7.0 et ArcView version 3.0 de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc, New York).

Ces deux systèmes combinés offrent une gamme d'outils en analyse spatiale et en visualisation qui a permis de traiter, d'analyser et de présenter les données recueillies.

- ◆ Le système de traitement d'image PCI version 6.1 (UNIX)

Ce système comprend les fonctions de traitements d'images : affichage, rehaussement, corrections géométriques et radiométriques, filtrages et classification. PCI a permis de traiter et de classifier les images satellitaires.

◆ SPSS version 6.0 et Excel version 7.0

SPSS (Statistical Product & Service Solution) est un logiciel d'analyse et de modélisation statistique qui a été utilisé pour traiter les données pluviométriques.

Microsoft Excel (Microsoft Office 97) est un chiffrier qui a servi à créer les différents tableaux et histogrammes.

6.3. Caractéristiques des pluies

6.3.1. Données pluviométriques

Les données de pluies ont été tirées de la base de données agro-météorologique HYDRE (projet en collaboration avec le Centre Commun de Recherche, Ispra et la Société Sicilienne de Promotion Industrielle de Palerme). Cette base de données contient les précipitations journalières et les valeurs des températures minimum et maximum mesurées aux 408 stations recouvrant l'île, sur une période de 28 ans (1960-1988). Les données de 52 stations ont été retenues (tableau 3). 21 stations couvrent le bassin versant du Simeto et les 31 autres se trouvent au pourtour du bassin (figure 5). Ainsi, elles forment un réseau suffisamment dense pour effectuer une bonne cartographie des champs pluviométriques.

Tableau 3 : Caractéristiques des stations météorologiques

NO	Stations météorologiques	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Nbr. D'années de mesure
130	MONTALBANO ELICONA	38,02472	15,01055	907	28
220	TORTORICI	38,02666	14,82500	475	28
280	ALCARA LI FUSI	38,02027	14,70138	400	28
310	S. FRATELLO	38,01444	14,59500	690	29
320	CARONIA	38,02305	14,44000	302	28
330	MISTRETTA	37,92833	14,36194	910	23
340	S. STEFANO DI CAMASTRA	38,01388	14,34916	135	27
350	CASTEL DI LUCIO	37,88583	14,31527	772	22
360	TUSA	37,98638	14,24055	613	21
370	S. MAURO CASTELVERDE	37,97694	14,19166	1109	29
1960	ENNA	37,56027	14,28166	950	29

suite (tableau3)

1970	VILLADORO	37,62000	14,24388	750	26
1980	VILLA PRIOLO	37,62638	14,19361	565	28
2000	GRANCI (FATTORIA)	37,74750	14,20888	650	21
2220	BUTERA	37,18638	14,18500	402	25
2250	PIAZZA ARMERINA	37,38361	14,36694	721	28
2320	VIZZINI	37,16000	14,75194	610	27
2500	PRESA S. NICOLA	37,10527	14,96888	371	24
2570	FRANCOFONTE	37,23083	14,91388	281	28
2580	LENTINI (CITTA')	37,28888	15,00027	43	28
2590	LENTINI (BONIFICA)	37,30583	14,96472	10	28
2660	MANIACI	37,85250	14,83638	680	24
2690	CESARO'	37,84222	14,70222	1100	22
2750	TROINA	37,78722	14,60138	1038	23
2790	BRONTE	37,78416	14,83416	780	28
2800	NICOSIA	37,74666	14,41583	800	23
2830	CERAMI	37,80944	14,50916	1020	28
2840	GAGLIANO CASTELFERRATO	37,70944	14,53583	837	22
2860	AGIRA	37,65361	14,52416	824	27
2930	MOTTA S. ANASTASIA	37,51000	14,96916	275	26
2940	LEONFORTE	37,63555	14,39333	640	29
2960	VALGUARNERA	37,49305	14,39416	629	28
2980	CATENANUOVA	37,56805	14,69055	173	29
2990	CASTEL DI IUDICA	37,48833	14,69361	500	24
3000	RADDUSA	37,47416	14,53583	300	23
3020	AIDONE	37,41444	14,44638	809	21
3030	MIRABELLA IMBACCARI	37,32555	14,44611	450	21
3050	CALTAGIRONE	37,24027	14,51250	513	29
3060	MINEO	37,26305	14,69222	510	29
3070	RAMACCA	37,21472	14,69333	270	28
3090	NICOLOSI	37,61166	15,02472	698	28
3110	ZAFFERANA ETNEA	37,69388	15,10555	590	27
3120	LINGUAGLOSSA	37,83805	14,52611	560	25
3130	VIAGRANDE	37,81944	15,16805	405	23
3140	PIEDIMONTE ETNEO	37,80583	15,18000	348	26
3150	ACIREALE	37,61194	15,16694	194	27
3170	CATANIA (G.C.OO.MM.)	37,49944	15,07416	4	23
3210	FLORESTA	37,98722	14,90916	1250	28
3250	RANDAZZO	37,87666	14,95111	720	27
3270	ROCCELLA VALDEMONE	37,93250	15,00972	655	24
3280	FRANCAVILLA DI SICILIA	37,90361	15,13500	463	26
6203	CATANIA (OSSERVATORIO)	37,51638	15,10194	65	21

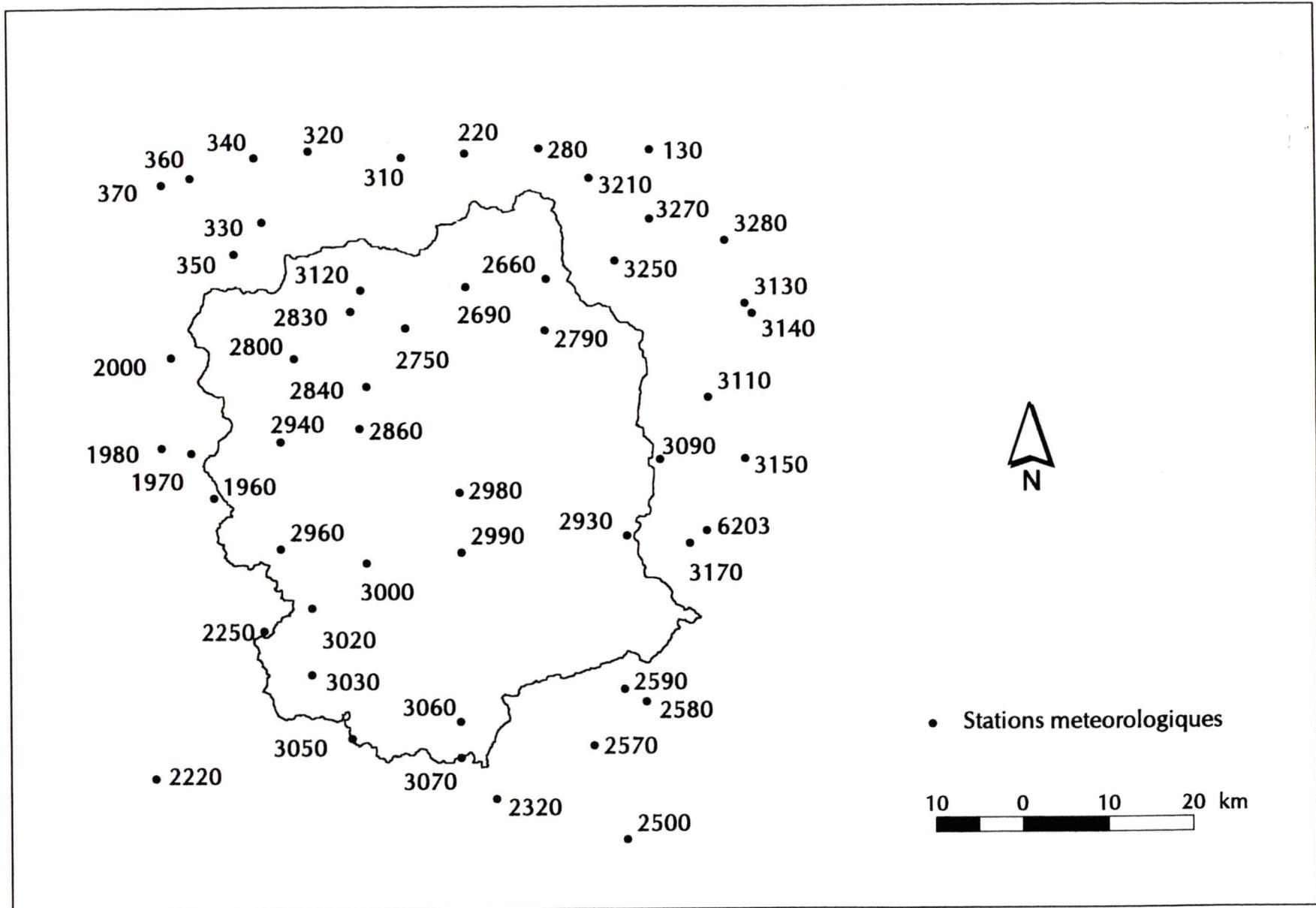


Figure 5: Stations météorologiques

réalisée par: Annie Clark

Pour le choix de ces stations, un quadrilatère a été dessiné autour des limites du bassin versant. 78 stations étaient comprises dans ces limites. Une analyse de la fréquence des données a été faite avec les stations retenues. Les stations ayant un taux de fréquence inférieur à 70 % ont été éliminées. En d'autres termes, nous avons retenu les 52 stations météorologiques possédant plus de 20 années de mesures. Les stations ne répondant pas à ce critère ont été éliminées de la base de données. Pour acquérir une série continue, nous avons estimé les données manquantes à l'aide de moyennes pondérées qui assignent une valeur moyenne pondérée des valeurs issues des trois stations les plus proches. Ce traitement a été effectué avec le logiciel de statistiques SPSS version 6.0.

L'analyse des données pluviométriques repose sur les hauteurs annuelles et journalières des précipitations mesurées aux 52 stations qui couvrent le bassin du Simeto sur une période de 28 ans (1960-1988). Avec une base de données suffisamment complète et de bonne qualité, les moyennes journalières et annuelles des précipitations ont été calculées. Les moyennes mensuelles ont également été estimées pour permettre d'évaluer les variations intra-annuelles. Finalement, ces données calculées ont été intégrées dans le SIG Arc/Info pour effectuer la cartographie des données pluviométriques.

6.3.2. Interpolation spatiale des précipitations

L'interpolation spatiale est une procédure utilisée en géographie physique. En terme mathématique, elle se définit comme suit:

... Spatial interpolation is an estimation problem that typically uses linear combinations of observed values to determine values at unsampled locations (Robeson, 1993, p. 10).

Les fonctions linéaires utilisées pour estimer la variation spatiale doivent être en mesure de fournir une estimation la plus exacte possible du champ original. Ceci dépend d'abord de l'objectif visé par l'utilisateur et de la précision des données de départ. Les interpolations peuvent être divisées en deux classes, tout dépendant si

elles considèrent l'ensemble des données (*global techniques*) ou bien un sous-ensemble de données (*local techniques*). Les techniques les plus appropriées pour l'analyse des précipitations sont celles qui estiment les valeurs pluviométriques selon les valeurs retrouvées aux stations météorologiques voisines (*local techniques*). Plusieurs méthodes existent, la plus utilisée étant celle des *polygones de Thiessen*, qui assigne une valeur de la plus proche station météorologique à une zone donnée (polygone). Par contre, cette technique n'est pas à conseiller lorsque le site d'étude est très accidenté. Comme autres méthodes souvent utilisées, il y a l'*inverse distance weighted* (IDW), la fonction polynomiale *spline* et le krigeage. Cette dernière semble fournir les meilleurs résultats au niveau de la variation pluviométrique. Par contre, ce type d'interpolation est statistiquement complexe. Elle demande donc un temps de traitement assez long, variant selon le nombre de données spatiales à interpoler.

Dans cette étude, l'objectif visé est la représentation spatiale des pluies. Il est connu que les pluies varient dans le temps et dans l'espace. Les causes de cette variation spatio-temporelle sont autant d'ordre géographique, topographique que météorologique. Par exemple, la topographie influe grandement sur les précipitations. Étant donné son influence sur le régime thermique, l'altitude d'un lieu détermine en général la forme des précipitations qu'il reçoit.

En conséquence, plusieurs études basées sur de simples méthodes d'interpolation linéaire pour effectuer la cartographie des champs pluviométriques n'ont pas donné des résultats satisfaisants (Voet en al, 1994). Cette variable demeure difficile à estimer correctement.

Toutefois, le besoin de cette étude est d'obtenir rapidement une représentation de la variation spatiale des précipitations du bassin versant du Simeto. Ainsi, une méthode d'interpolation de type linéaire, nommée *Spline* a été retenue pour effectuer la représentation spatiale des pluies. Cette méthode a été préférée au krigeage pour les raisons suivantes :

- ◆ *Spline* ne demande pas un nombre élevé de paramètres ;

- ◆ *Spline* est statistiquement simple, et demande un temps de traitement assez court ;
- ◆ *Spline* donne une présentation plus adoucie.

La prise en considération du relief ou d'une autre variable n'a pas été retenue. Néanmoins, pour une meilleure analyse, les différents résultats de l'interpolation ont été mis en relation avec le modèle numérique d'altitude (MNA).

La vérification des données interpolées s'est faite de façon simple. Les données obtenues ont été confrontées aux données de départ. De plus, nous avons comparé les résultats avec une étude antérieure (Salvatore, 1989).

Par la suite, les résultats ont été explorés en appliquant différentes classifications disponibles dans ArcView. La méthode de classification *Quantile* a été retenue. Cette méthode offre une bonne représentation pour des données distribuées de façon linéaire. Cinq classes ont été assignées. Un nombre plus élevé de classes n'offrirait pas une meilleure précision. Ainsi, deux cartes numériques (format matriciel) ont été créées soit les précipitations moyennes annuelles et les précipitations moyennes journalières.

6.4. Modèle numérique d'altitude

Le modèle numérique d'altitude (MNA) provient de l'Institut Géographique Militaire de l'Italie (IGMI). Il a été réalisé à partir d'un fichier de points et de lignes contenant les valeurs d'altitude. Ces points correspondent aux courbes de niveaux qui proviennent de 10 cartes topographiques à l'échelle 1: 50 000 avec une équidistance de 25 m. À l'aide de ces points numérisés, un MNA a pu être généré par interpolation. Une forme numérique d'une résolution spatiale de 60 mètres a donc été créée dans *Arc/Info* avec le module *TopoGrid*. Une résolution plus fine (30 m) aurait été souhaitable, mais le bassin du Simeto d'une superficie de 4177 km² est très vaste. Le temps de traitement s'est avéré trop long. Le choix s'est donc porté sur une résolution plus large pour éviter des complications techniques.

Ensuite, à l'aide des fonctions d'analyse spatiale et d'hydrologie disponibles dans le module GRID d'Arc/Info, il a été possible de générer différents fichiers représentant : le relief, la pente, la limite du bassin versant et des différents sous-bassins et le réseau hydrographique.

6.4.1. Données dérivées du MNA

Dans un premier temps, avec la fonction *watershed* d'Arc/Info, nous avons délimité le bassin versant le Simeto et ses sous-bassins. Les limites du bassin ont servi à découper le territoire à l'étude pour permettre de délimiter la région concernée et diminuer la longueur des traitements à effectuer. Dans un deuxième temps, à l'aide de la fonction *streamnet* d'Arc/Info, il a été possible de calculer le réseau hydrographique. Ensuite, la fonction *slope* a été utilisée pour calculer les données de pentes en pourcentage pour chacun des pixels.

6.4.2. Représentation cartographique

La représentation cartographique des différentes données dérivées du MNA a été réalisée dans ArcView. Tout d'abord, une carte du réseau hydrographique et une carte des sous-bassins versants du Simeto ont été produites.

En deuxième lieu, les données d'altitude interpolées ont été visualisées et classées dans ArcView selon la méthode de classification *natural breaks*. Cette classification identifie les coupures entre les différentes classes en utilisant la méthode *Jenks*. Cette méthode minimise la somme de la variance entre les types de découpages. Elle fait donc ressortir les différences entre les données à classifier. Six classes ont donc été déterminées à l'aide de ce type de classification. Ces six classes ont permis de bien faire ressortir les principaux ensembles physiographiques.

Ensuite, selon des critères basés sur les différents aménagements possibles à certains niveaux de pentes et sur les limites de l'USLE, des classes représentatives ont été définies et appliquées aux données de pentes. Cinq classes de pentes en ressortent, soit : 0-8 %, 8-18 %, 18-30 %, 30-60 %, 60 % et plus. Une pente de 8 % est la limite permise pour une utilisation intensive du sol. C'est-à-dire, une utilisation

qui entraîne un arrachement total du couvert végétal et laisse le sol sans protection. L'application de l'USLE sur des pentes de plus de 18 % peut fausser les résultats (Wischmeier, 1976). Les estimations de pertes de sols sur des pentes supérieures à 18 % sont le résultat d'extrapolation des tendances observées (Dion, 1989). Des pentes de 30 % demandent une protection constante du sol et des pentes de 60 % et plus sont considérées très dangereuses. La pente d'équilibre des matériaux se situe à 30° (57,7 %). Au delà de cette limite, la majorité des matériaux meubles ont de la difficulté à tenir en équilibre.

6.5. Nature des roches et des sols

6.5.1. Données lithologiques et pédologiques

Les données portant sur la nature du substratum rocheux et des sols proviennent de la carte des sols de la Sicile à l'échelle du 1 : 250 000 (Fierotti et *al*, 1988). Cette carte a été numérisée dans le logiciel Arc/Info par l'équipe du projet POP Sicilia au CCR, Ispra. Elle contient de l'information sur 33 associations pédologiques et sur 18 types pédologiques différents. Ce qui fait 2200 polygones numérisés. Pour les fins de cette étude, 439 polygones recouvrant le bassin versant du Simeto ont été retenus. Ils contiennent des informations sur le substrat présent et les types de sols qui le recouvrent. Pour une meilleure analyse, d'autres qualificatifs comme la texture et les faciès ont été rajoutés à la base de données.

6.5.2. La cartographie des données lithologiques et pédologiques

La représentation des données lithologiques et pédologiques s'est effectuée dans ArcView. La cartographie de ces données avait pour but de faire ressortir la diversité spatiale des différents ensembles géologiques et pédologiques présents et de diviser la région en zones homogènes. Dans un premier temps, des cartes représentant le substratum rocheux (figure 6), les différents sols (figure 7) et les faciès ont été réalisées. Entre parenthèses, un faciès est l'ensemble des caractères d'un sédiment et il peut être érodé, pierreux, salin, etc.

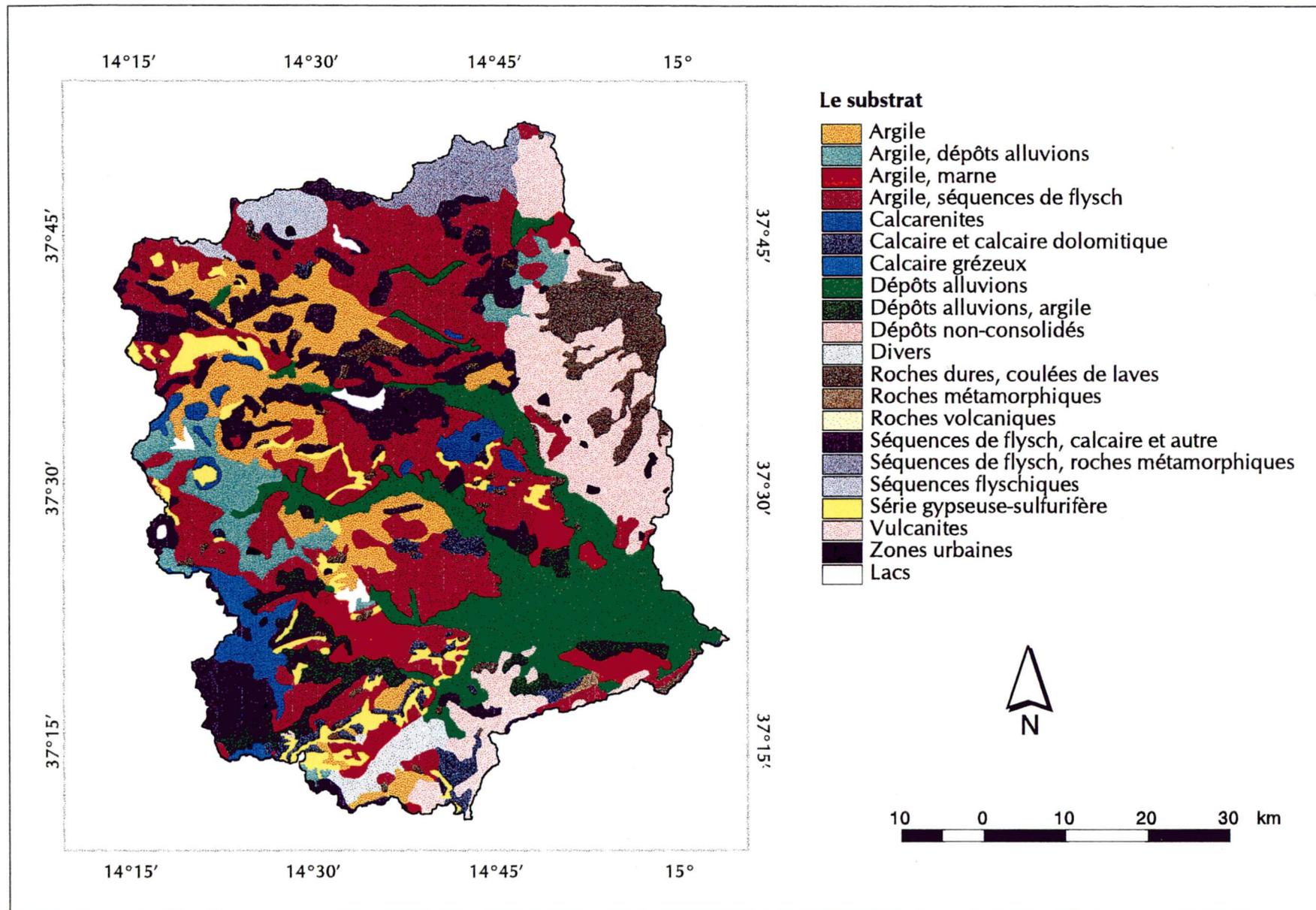


Figure 6: Carte du substrat rocheux

réalisée par: Annie Clark

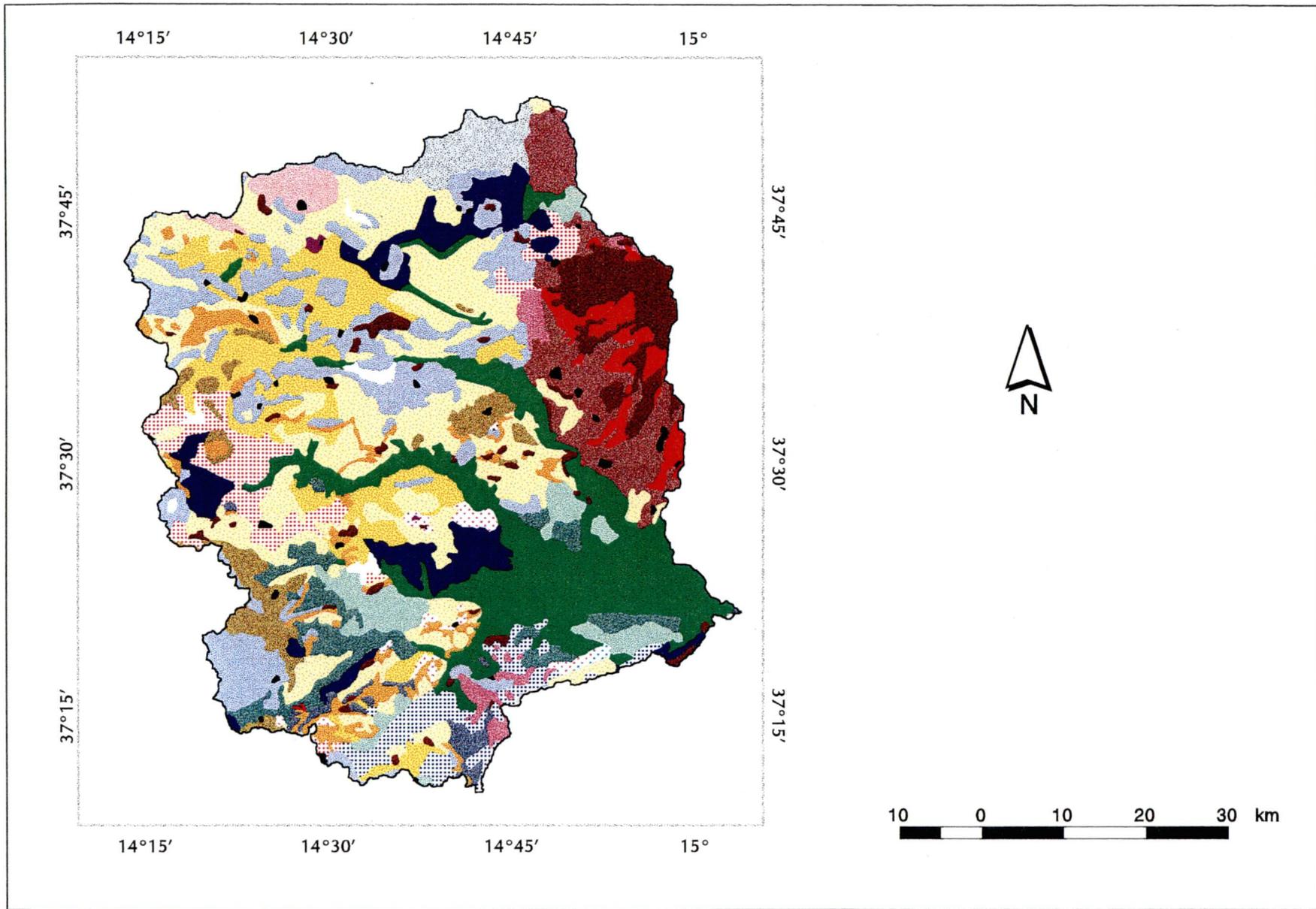


Figure 7: Carte des sols

réalisée par: Annie Clark

Les différentes classes de sols basées sur la classification française

	Affleurements rocheux, Lithosols
	Affleurements rocheux, Lithosols, Terre rouge
	Lithosols, Affleurements rocheux
	Lithosols, affleurements rocheux, Sols bruns andique
	Lithosols, Affleurements rocheux, Sols bruns
	Lithosols, Sols bruns lessivés, Sols bruns
	Régosols, Lithosols, Sols bruns andique
	Régosols, Lithosols, Sols bruns et/ou sols bruns vertique
	Régosols, Sols bruns et/ou sols bruns vertique, Dépôt alluvions et/ou vertisols
	Régosols, Sols bruns et/ou sols bruns vertique
	Régosols, Dépôts alluvions et/ou Vertisols
	Régosols, Sols bruns andique, Sols bruns lessivés
	Régosols, Sols bruns. Sols bruns légèrement lessivés
	Dépôts alluvions, Vertisols
	Vertisols
	Sols bruns, Sols bruns calcaireux
	Sols bruns, Sols bruns vertique, Vertisols
	Sols bruns, Dépôts alluvions
	Sols bruns, Sols bruns lessivés, Régosols et/ou Lithosols
	Sols bruns acides, Lithosols, Affleurements rocheux
	Sols bruns légèrement acide, Sols bruns, Sols bruns lessivés
	Sols bruns andique, Lithosols
	Sols hydromorphes
	Dépôts alluvions
	Zones urbaines
	Lacs

source: Carte des sols de la Sicile au 1:250 000, Giovannie Fierotti, 1988

Figure 7b: Légende de la carte des sols

En deuxième lieu, les différents types de roches, de sols et de faciès ont été regroupés créant des zones plus vastes. Ce regroupement des différents qualificatifs a permis une évaluation plus large du paysage. Ceci a été utile pour identifier les grandes régions principales. Ainsi, trois cartes ont été réalisées soit : une carte des différentes zones géologiques, une carte des différentes zones pédologiques et une carte des différents faciès.

6.6. Images satellitaires

6.6.1. Données de télédétection

Dans le cadre de cette étude, six images satellitaires d'une résolution de 30 m ont été mises à notre disposition. Ce sont des images TM du capteur Landsat acquises à différentes périodes durant l'année 1985 (tableau 4). Il y a trois images comprenant le deuxième quart de la scène 189/34 et trois autres images comprenant le premier et le troisième quart de la scène 188/34. Cette série d'images offre une bonne distribution dans le temps, ce qui a permis d'acquérir de l'information sur la variation saisonnière du couvert végétal. Ceci a été très utile lors de la classification des différents couverts.

Tableau 4: Dates des images TM du capteur Landsat

Scène 188/34	Scène 189/34
15 février 1985	
22 mai 1985	1 août 1985
10 août 1985	4 octobre 1985

6.6.2. Traitements numériques

Les différentes images, en format binaire, ont été visualisées et traitées à l'aide du logiciel PCI. Elles ont subi deux phases de traitements numériques : les corrections atmosphériques et les corrections géométriques. Les corrections atmosphériques sont nécessaires puisque les conditions atmosphériques varient continuellement durant l'année. Ainsi, pour effectuer une analyse multi-temporelle, il est utile de faire

des corrections atmosphériques pour rapporter toutes les images à des conditions radiométriques équivalentes. Il faut noter que ces images ont été corrigées radiométriquement par les membres de l'équipe à Ispra, Italie, ceci avant d'arriver en notre possession.

La seconde phase de traitement se traduit par des corrections géométriques. En effet, il est nécessaire de corriger géométriquement les images selon un système de référence spatiale (U.T.M. : zone 33) pour pouvoir les intégrer dans un SIG comme ArcView. Ceci va permettre de mettre en relation les images satellitaires avec les autres types d'informations géographiques (le réseau hydrographique, les cartes de sols, le MNA, ect.). À l'aide du programme *GCP works* de PCI, les images du 27-04-1985 et du 15-02-1985 ont été mises en relation avec le MNA. Les coordonnées en U.T.M. d'une dizaine de points de contrôle sélectionnés sur les images ont été entrés dans le programme. Les points de contrôle ont été choisis sur les feuillets topographiques au 1 : 50 000. Ensuite, les deux images ont été rééchantillonnées à l'aide de l'algorithme de la convolution cubique. Pour ce qui est des autres images, on a utilisé les images géoréférencées plutôt que le MNA et les points de contrôle pour effectuer les corrections géométriques. Cette précaution est nécessaire pour éviter que les images se retrouvent décalées les unes des autres.

6.6.3. Classification des images

L'hétérogénéité spatiale du paysage a rendu difficile la classification des images. Ainsi, une seule image (10-08-1985) a été classifiée en s'aidant des autres images. Tout d'abord, l'évaluation du couvert s'est faite en appliquant une classification non-dirigée sur les six images. Ceci a permis d'obtenir un premier aperçu des différents couverts présents sur le bassin du Simeto et de choisir l'image comportant le plus haut contraste entre les différents couverts pour obtenir des classes le plus distinctes possible. Ensuite, une classification par voie dirigée a été appliquée à l'image du 10-08-1985. Ceci implique la connaissance de sites d'entraînement qu'il est possible d'identifier sur l'image. À l'aide d'une bonne base de données pédologiques, des cartes topographiques bien détaillées, d'un MNA et des observations sur le terrain, il

a été possible de localiser les principaux couverts. Sept classes d'occupation ont été identifiées : l'eau, la lave récente, les zones céréalières, les zones de pâturages, les zones forestières et de plantations irriguées, les zones de plantations non irriguées et les zones de sols nus.

6.6.4. Intégration dans un SIG

L'intégration de l'image classifiée dans le SIG s'est effectuée en deux étapes. La première a consisté à exporter l'image en format PCI en un autre format qui peut être importé dans le SIG utilisé (Arc/Info). Notre choix a été le format TIFF puisqu'il permet d'exporter (GeoTIFF) les informations concernant la géoréférence. Ce critère est important pour mettre en relation l'information sur les différents couverts avec les autres types d'informations présents dans le SIG. Deuxièmement, l'image exportée a été lue et traitée dans Arc/Info. Une carte matricielle a été créée et présentée dans le SIG ArcView en appliquant une légende pour chacune des couvertures. Cette dernière étape de traitement terminée, il a été possible de combiner les différentes informations disponibles et créer des liens entre chacun des facteurs physiques intégrés dans le SIG et les couvertures de sol.

7. Présentation et analyse des résultats

La deuxième partie de ce travail comprend les différentes étapes d'analyse nécessaires pour identifier les unités de paysage et localiser les zones où il est possible d'appliquer l'USLE. Afin de déterminer ces unités de paysage, une analyse des caractéristiques physiques du territoire a été réalisée dans le but de mieux saisir la complexité du paysage. Ensuite, les cartes produites ont été mises en relation les unes avec les autres pour effectuer une analyse de correspondance entre les différentes conditions du milieu. Finalement, on a analysé le paysage à travers les limites du modèle. Ceci a permis de vérifier s'il était possible d'utiliser l'USLE sur les unités identifiées.

7.1. Hétérogénéité spatiale du bassin versant le Simeto

7.1.1. Conditions physiographiques : relief et pentes

Le bassin du Simeto possède une altitude moyenne relativement forte dû à l'intensité du soulèvement quaternaire (plus du tiers du bassin s'élève à des altitudes supérieures à 250 m) (tableau 5). Une grande partie de la topographie du bassin correspond à des zones de collines et de montagnes (figure 8). On y retrouve une faible proportion de plaine à l'exception de la plaine de Catane (430 km²) au sud-est du bassin.

Tableau 5: Statistiques des données d'altitude

Altitude (m)	Superficie (km ²)	Superficie (%)
0-256	1198,51	28,69
257-530	1241,95	29,73
531-829	918,76	22,00
830-1203	526,53	12,06
1204-1904	260,92	6,25
1905-3313	31,18	0,75
Totaux	4177,85	100

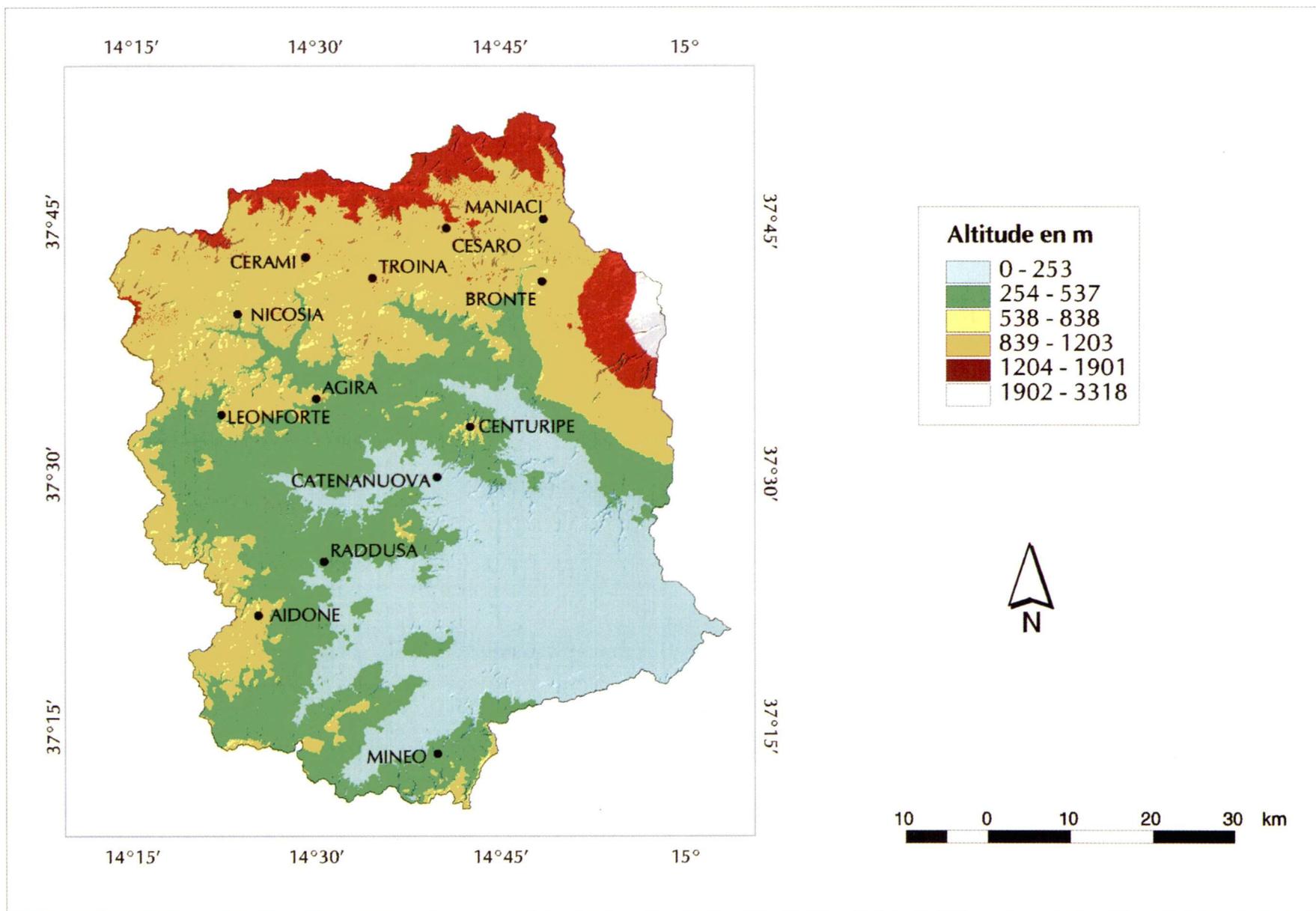


Figure 8: Modèle numérique d'altitude (MNA)

réalisée par: Annie Clark

Deux alignements de chaînes de montagnes ayant une origine géologique récente occupent le nord et le sud du bassin du Simeto. Au nord, ce sont les monts Nebrodi (1 847 m). Ces monts font partie intégrante de l'Apennin sicilien, un relief majeur qui court au nord, parallèlement à la mer Tyrrhénienne. Il est le prolongement de l'Apennin calabrais en direction de l'Atlas tunisien (Vidal de la Blache et Gallois, 1938). Au sud, le bassin est délimité par les monts Iblei. Ceux-ci font partie du deuxième alignement qui est orienté sud-est, nord-ouest. Ce milieu est plutôt aride vu le caractère calcaire du terrain. L'altitude est plus modeste, mais ceci n'empêche pas la présence de larges gorges (Vidal de la Blache et Gallois, 1938). D'ouest en est, ce sont les montagnes de Madonie (1 977 m) et le massif volcanique de l'Etna avec la Mer Ionienne qui délimitent le bassin. Effectivement, la Sicile compte un volcan actif, l'Etna (3 300 m) qui domine la riche plaine de Catane. L'Etna est le plus grand volcan actif d'Europe (Girbas, 1997).

À travers ce paysage de collines et de montagnes, s'intercale la plaine de Catane (430 km²). Elle est caractérisée par des terrasses quaternaires où se cachent çà et là des argiles ravinées. Plus bas, ce sont des dépôts d'alluvions récents du Simeto et de ses affluents auxquels s'ajoutent les apports volcaniques de l'Etna (Girbas, 1997). Ces marais, autrefois insalubres, sont aujourd'hui la plus fertile plaine de l'île (Girbas, 1997).

Parallèlement à la carte des altitudes, la présence d'un relief accidenté s'observe également sur la carte des pentes (figure 9). L'analyse des données de pentes révèle que plus de 33 % de la superficie du bassin versant comporte des pentes supérieures à 18 % (tableau 6). Ce qui signifie qu'il est difficile d'estimer les pertes de sols sans risquer d'obtenir des résultats extrapolés sur plus du tiers du bassin. Dans la région de Mineo et de Centuripe, il y a présence de pentes supérieures à 60 %. Ces endroits sont très sensibles à l'érosion hydrique. Si le sol est mis à nu, il y a un risque de désertification et de ravinement. De plus, la présence d'une mosaïque complexe d'unités de pentes démontre la forte hétérogénéité spatiale au niveau de la physiographie.

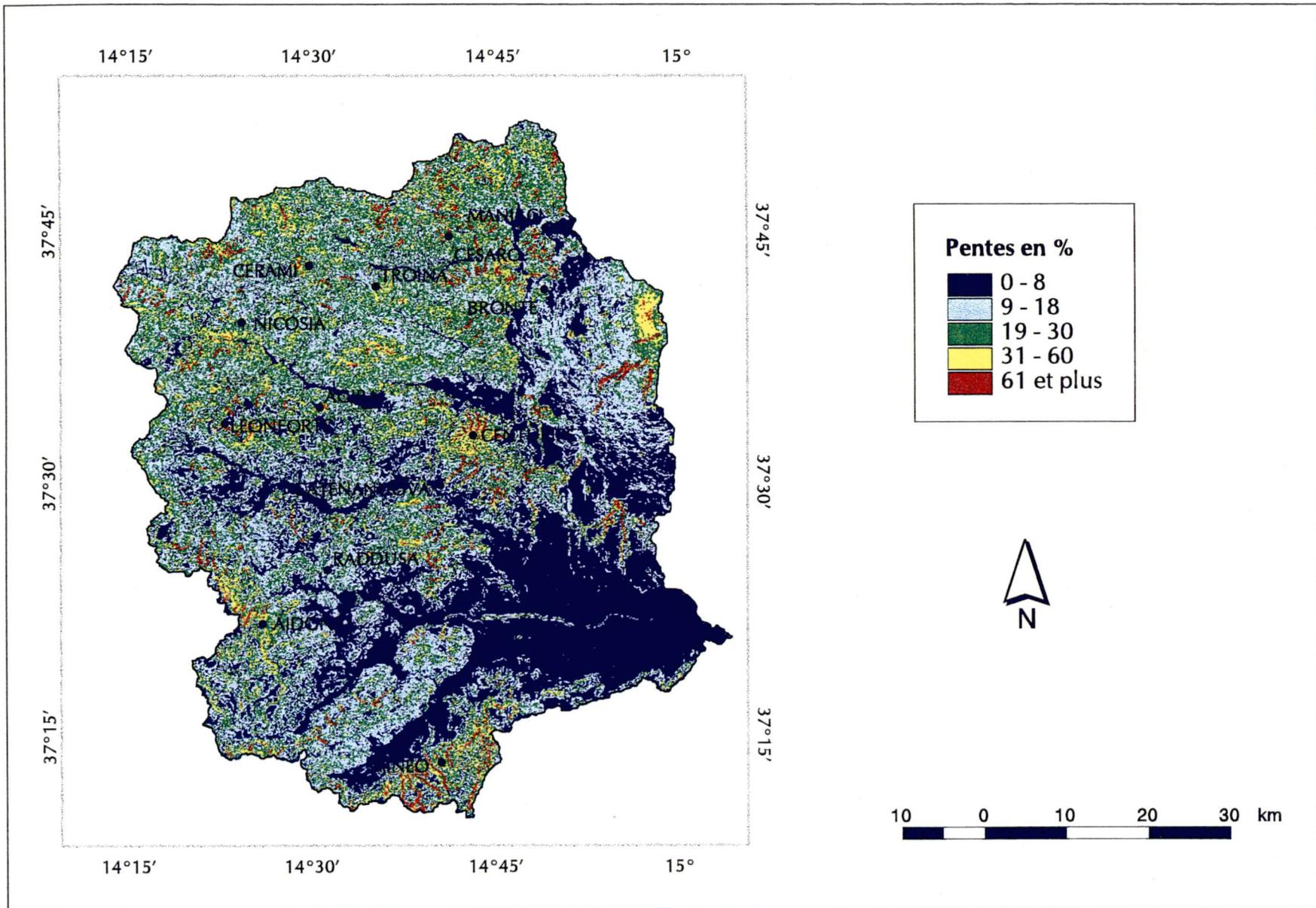


Figure 9: Carte des pentes

réalisée par: Annie Clark

Tableau 6: Statistiques des classes de pentes

Classes de pentes	Superficie (km ²)	Superficie (%)
0 - 8 %	1475,43	35,32
8 - 20 %	1313,84	31,45
20 - 30 %	905,54	21,68
30 - 60 %	398,53	9,42
60 % et plus	84,51	2,02
Totaux	4177,85	100

7.1.2. Conditions pluviométriques : caractéristiques des pluies

Tomasi di Lampedusa (1959, p. 165) écrit « ... et puis les pluies, toujours impétueuses, qui rendent fous les torrents desséchés, qui noient bêtes et gens là où, deux semaines plus tôt, les unes et les autres crevaient de soif.» Cet auteur du roman *Le guépard* fait une description romancée des pluies siciliennes. Toutefois, cette analyse est réelle, la pluie étant une variable très capricieuse.

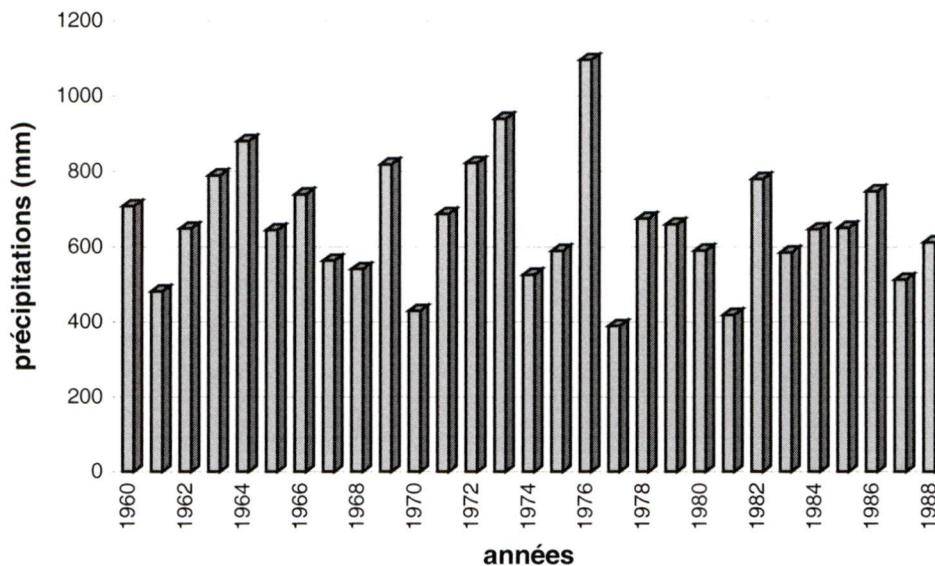


Figure 10: Précipitations moyennes annuelles du bassin du Simeto (1960-1988)

L'analyse de 25 ans de mesures pluviométriques démontre bien cette grande variabilité temporelle des précipitations du bassin versant du Simeto (figure 10). Mensuellement, le bassin du Simeto possède une saison estivale sèche qui s'alterne avec une période hivernale humide (figure 11). De mai à septembre, on observe des pluies de moins de 50 mm alors que les mois les plus secs, de juin et juillet, reçoivent en moyenne moins de 10 mm par mois. Par contre, de septembre à octobre, nous passons de 50 mm à plus de 100 mm de pluies. Un contraste marquant qui est néfaste pour les zones de sols nus, nombreuses à cette période de l'année.

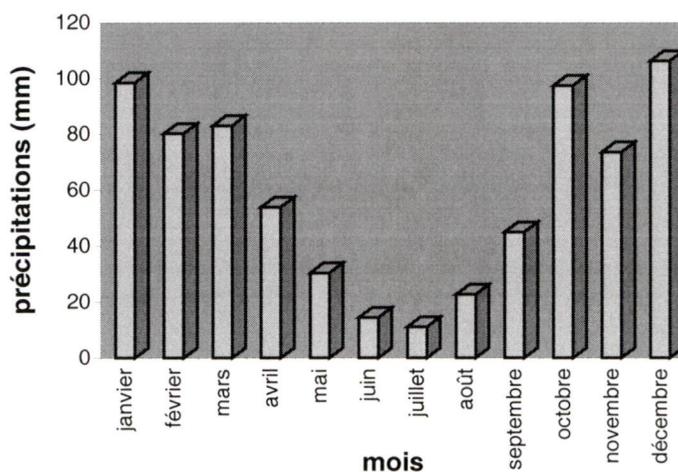


Figure 11: Précipitations moyennes mensuelles du bassin du Simeto (1960-1988)

La répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles fait ressortir l'effet du relief sur les pluies siciliennes. Il y a un fort contraste entre les régions périphériques du bassin et la plaine (figure 12). Le nord et le sud sont plus élevés et montagneux que le centre et le sud-est du bassin. Il ne pleut pas beaucoup dans ces régions de plaines. Les précipitations moyennes annuelles sont très faibles dans la plaine de Catane. Dans les zones de collines, c'est également plus aride, l'eau s'évapore rapidement. Déjà au mois d'avril, les rivières sont pratiquement sèches dans ces régions.

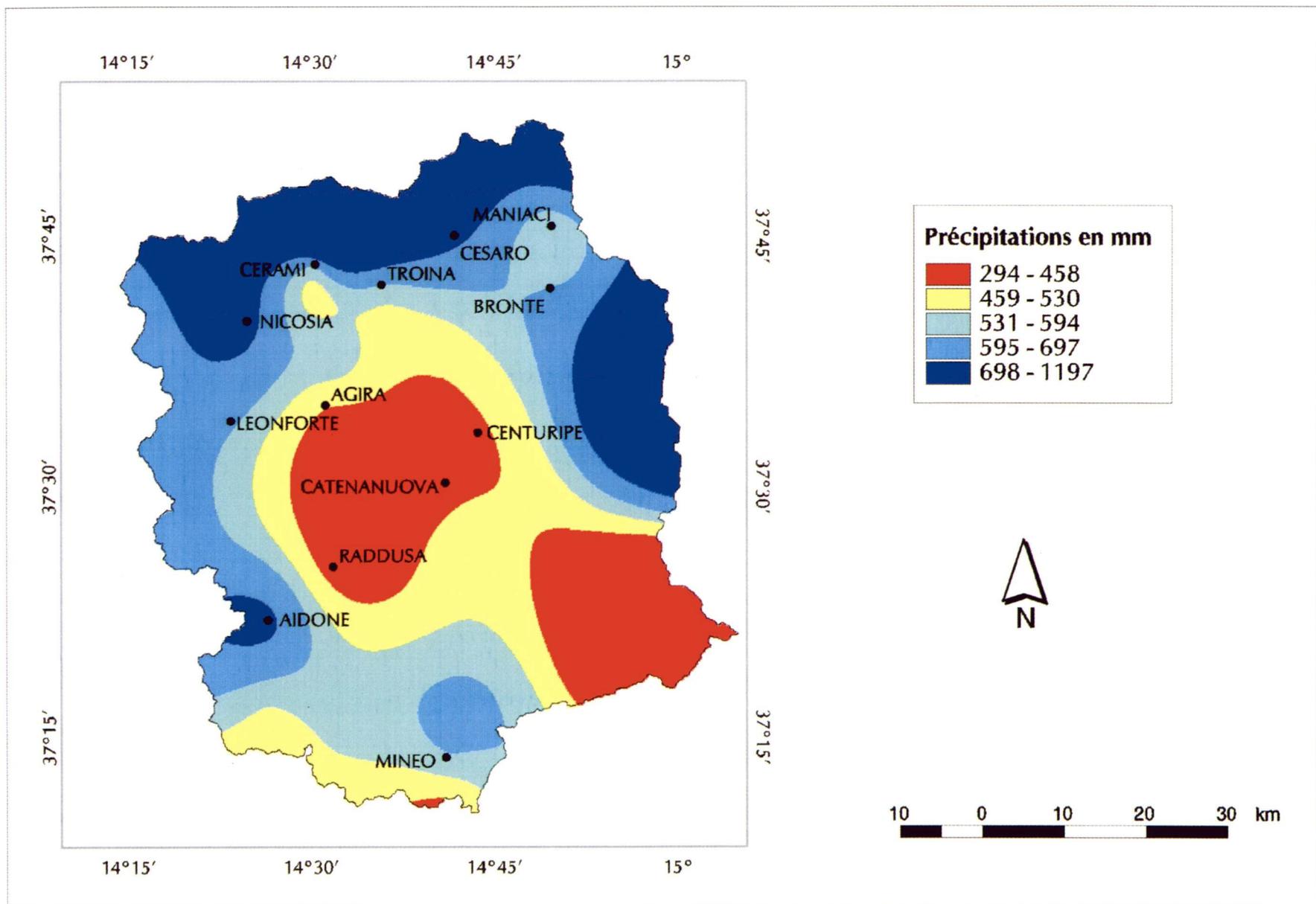


Figure 12: Carte des précipitations moyennes annuelles

réalisée par: Annie Clark

La comparaison des moyennes annuelles avec les données d'intensités extrêmes de pluies, enregistrées entre 1960 et 1988, démontre qu'il y a un lien entre l'intensité et la hauteur des pluies sur le bassin du Simeto. Les pluies de très forte intensité ont été enregistrées par les stations météorologiques situées en haute altitude, là, où annuellement, on enregistre les plus grandes quantités de pluies. Les plaines sont rarement atteintes par des pluies de forte intensité. La carte des pluies moyennes journalières (figure 13) démontre bien cette tendance. Ce sont les régions en haute altitude qui enregistrent les plus fortes pluies journalières (hauteur de pluie en 24 heures).

Toutefois, cette observation tient seulement du fait que les pluies de faible intensité donnent rarement naissance à des fortes hauteurs d'eau et que les fortes pluies développent donc une énergie cinétique plus élevée que les pluies de moindre importance.

Effectivement, il ne faut pas conclure trop rapidement, car le lien entre la quantité et l'intensité des pluies n'est pas nécessairement direct. Si on observe les cartes des précipitations moyennes annuelles et journalières, il est possible de remarquer que leur répartition spatiale est différente l'une de l'autre. Les pluies journalières ne sont pas liées directement à la quantité de pluies annuelles. Par exemple dans la région de Raddusa, on observe de fortes pluies journalières supérieures à 35 mm et de faibles pluies annuelles.

Ce qu'il faut retenir de ces observations, c'est la forte influence de la topographie sur la quantité et l'intensité des précipitations mesurées sur le bassin du Simeto et le caractère semi-aride de cette région de l'île.

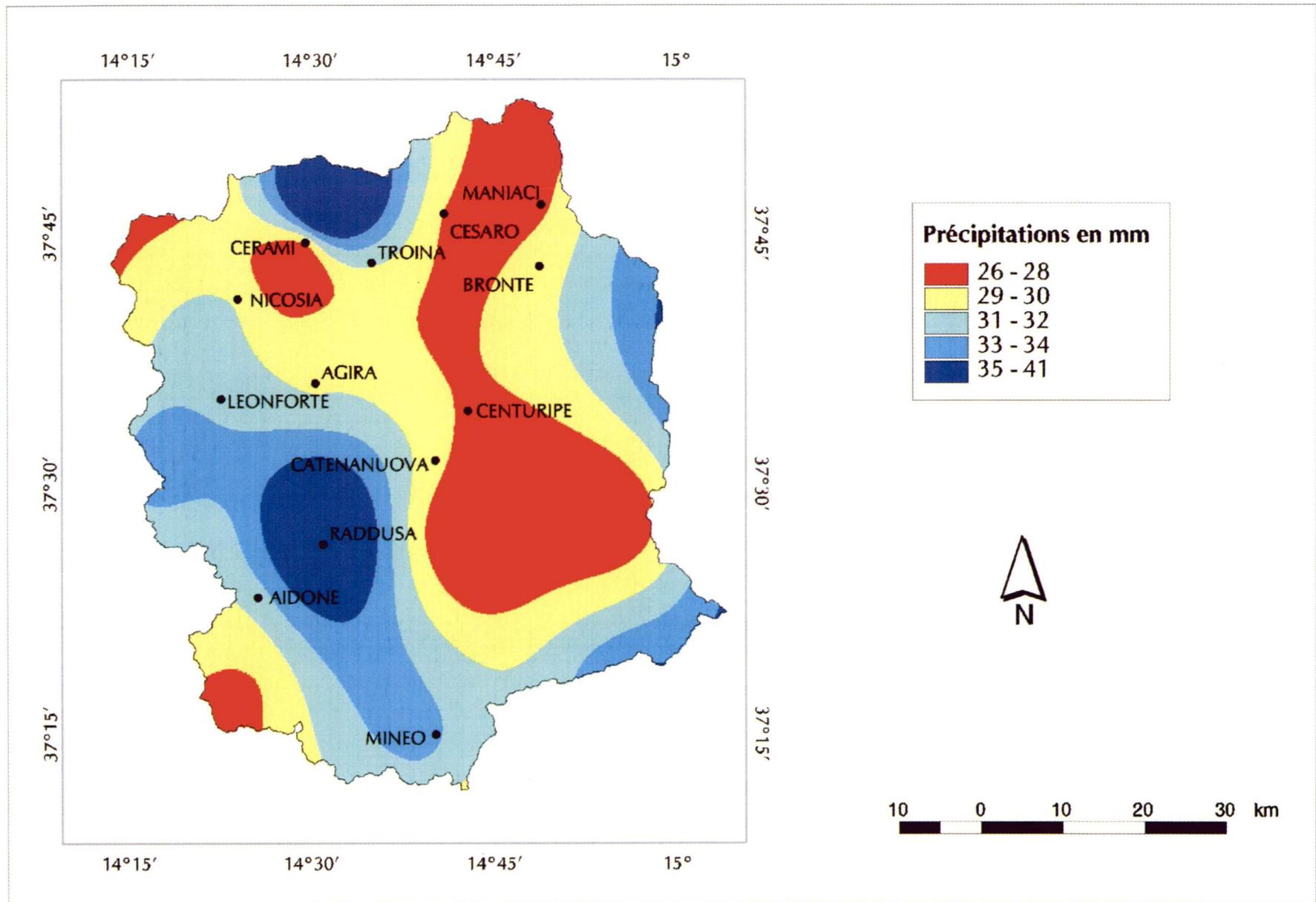


Figure 13: Carte des précipitations moyennes journalières

réalisée par: Annie Clark

7.1.3. Conditions de la végétation : types de couverts

L'analyse des différentes images et les renseignements recueillis sur le terrain ont révélé une hétérogénéité spatiale très élevée des différents couverts. Par exemple, on peut observer des cultures maraîchères, des cultures céréalières et des plantations d'agrumes sur une superficie de moins de 1 km² (figure 14). En général, on retrouve des plantations d'agrumes dans la plaine de Catane, la vallée du fleuve Simeto et de la rivière Gornalunga, des plantations non-irriguées (oliveraies, vignobles) sur les pourtours des plantations d'agrumes et des vignobles sur les pentes de l'Etna, des grands champs de céréales et des pâturages dans les collines et des forêts peu denses dans les régions plus élevées. Il y a également plusieurs secteurs de reboisement en eucalyptus le long des rivières et des lacs. Sans oublier, les zones urbaines et les quelques lacs artificiels qui alimentent les vallées en période de sécheresse. Les principaux sont les lacs Ancipa et Pozzillo sur deux affluents du Simeto.



(Clark, 1997)

Figure 14 : Hétérogénéité spatiale du paysage

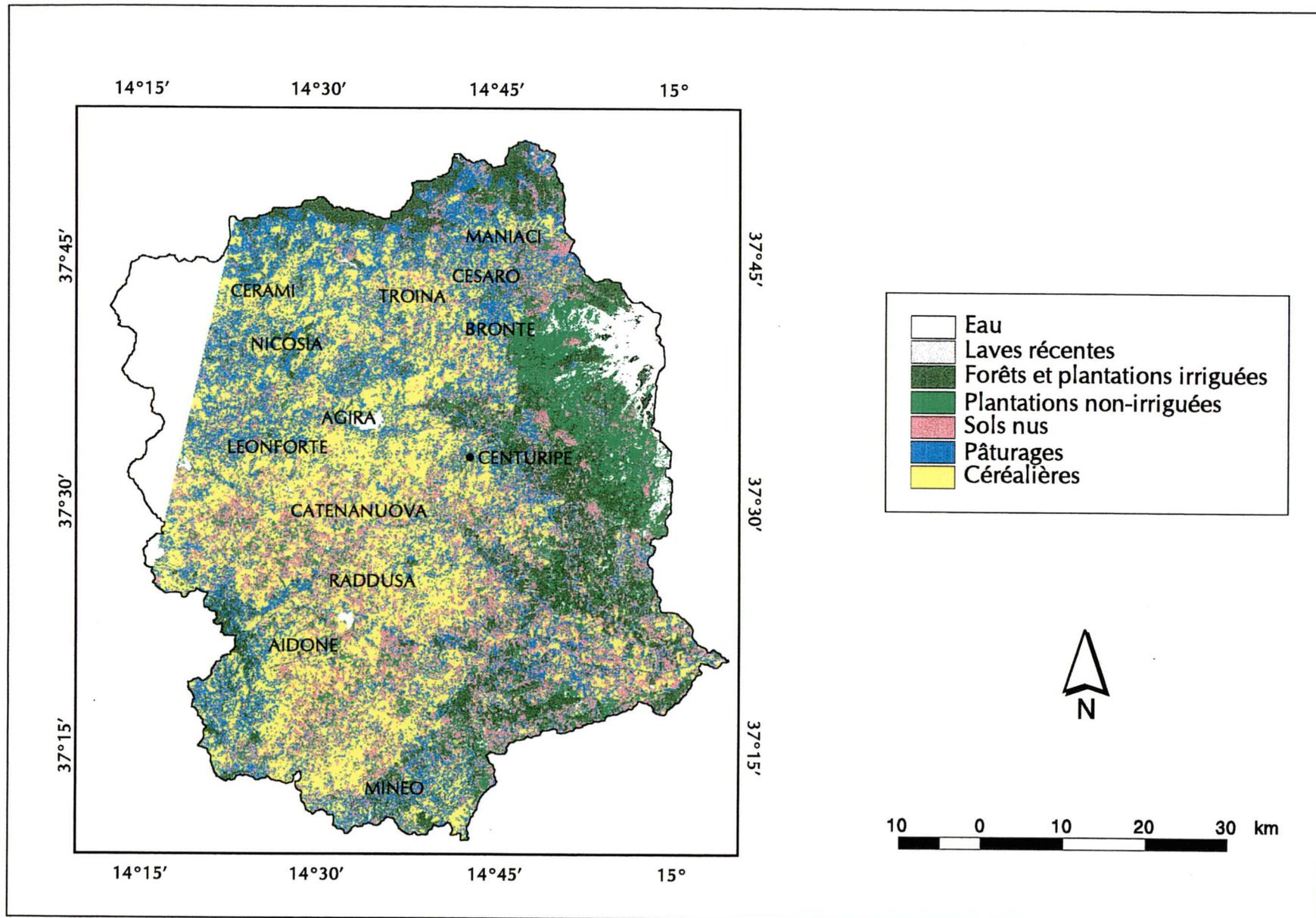


Figure 15: Carte des différents types de couvert

réalisée par: Annie Clark

7.1.4. Conditions géologiques et pédologiques : nature des roches et des sols

Du point de vue morphologique, le bassin versant du Simeto est très diversifié. Vu sa position géographique (en Sicile, au centre de la mer Méditerranée), sa géologie récente, son climat et une exploitation intense du sol depuis des millénaires, le bassin du Simeto possède différents types de roches et de sols (figure 16 à 18 et tableau 7).

Tableau 7: Statistiques des zones géologiques

Zones géologiques	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Dépôts alluvions	742,77	17,78
Argile	1681,68	40,25
Calcaire	220,56	5,28
Vulcanites & Roches dures	665,00	15,92
Gypse-sulfurifère	145,63	3,48
Séquences de flyschs	625,46	14,97
Divers	96,75	2,31
Totaux	4177,85	100,00

Grossièrement, le bassin du Simeto contient les secteurs suivants :

- ◆ les secteurs de roches volcaniques à forte pierrosité où l'on y retrouve un sol pauvre de type lithosol qui possède une évolution limitée souvent causée par l'érosion hydrique ;
- ◆ les secteurs de calcaire (calcaire dolomitique et calcarenites) qui se caractérisent par un sol rouge ferrallitique (*terra rossa*) typique des plateaux de calcaire méditerranéens ;
- ◆ quelques séries de gypse-sulfurifères sont présentes près des secteurs de calcaire. Un régosol avec un faciès salin recouvre ce substrat ;
- ◆ les secteurs d'accumulation alluviale récente dans la plaine et les lits de rivières dont une grande majorité de ces sols sont salins ;
- ◆ une grande proportion de séquences de flyschs qui se retrouvent dans les secteurs de hautes altitudes du bassin ;
- ◆ et finalement, les zones argileuses qui sont très nombreuses (tableau 7), elles sont caractérisées par un sol de type régosol raviné.

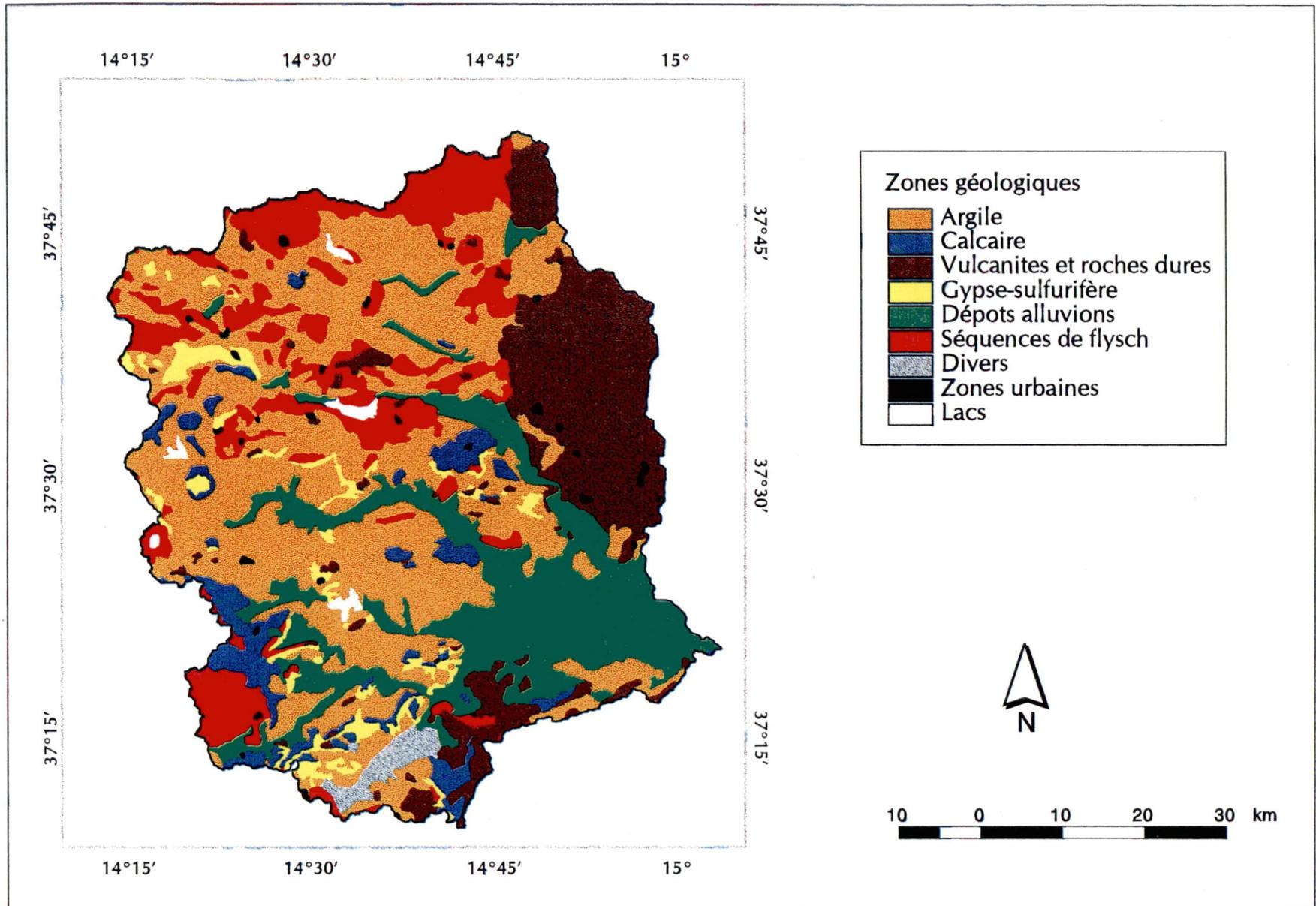


Figure 16: Carte des différentes zones géologiques

réalisée par: Annie Clark

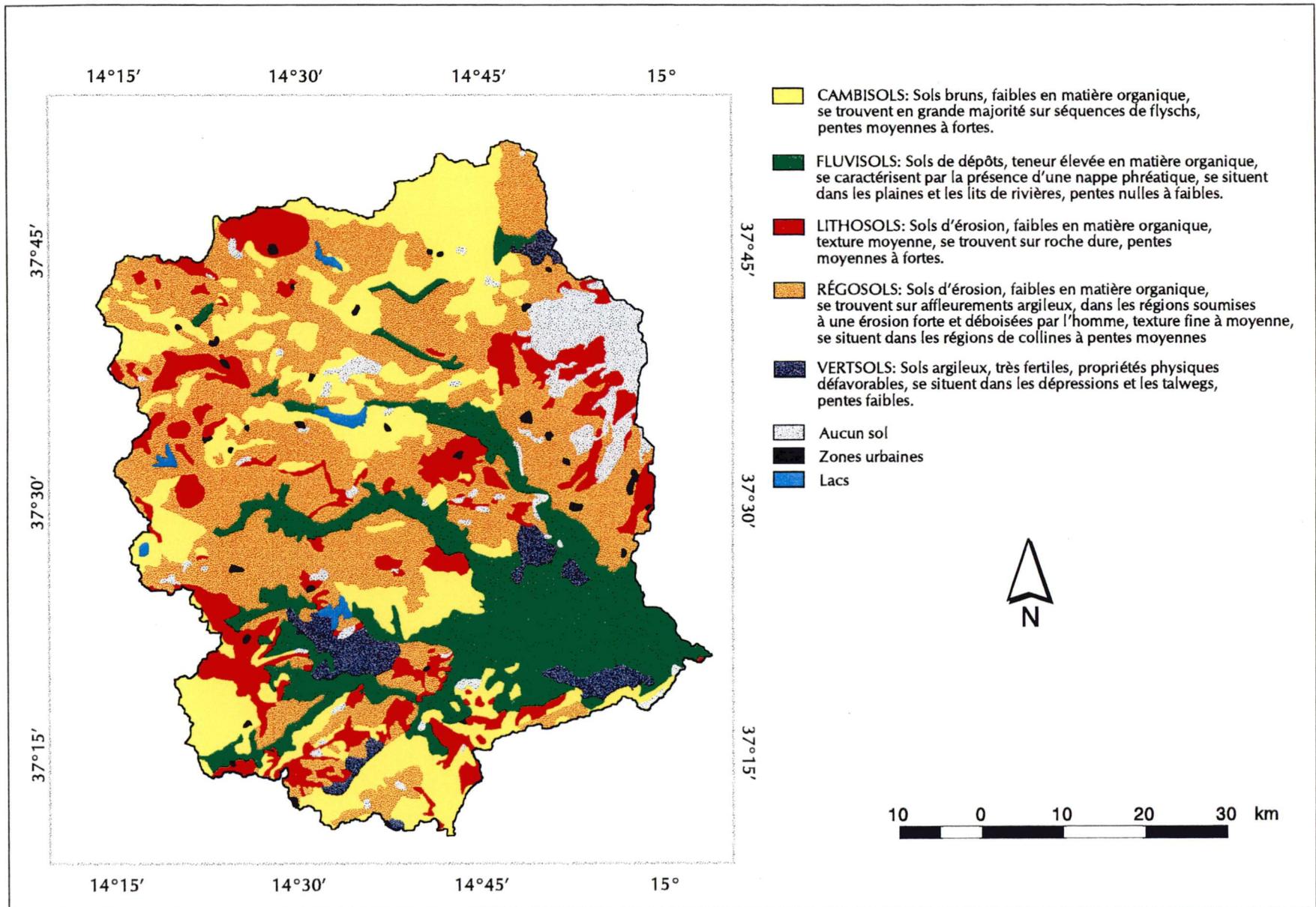


Figure 17: Carte des différentes zones pédologiques

réalisée par: Annie Clark

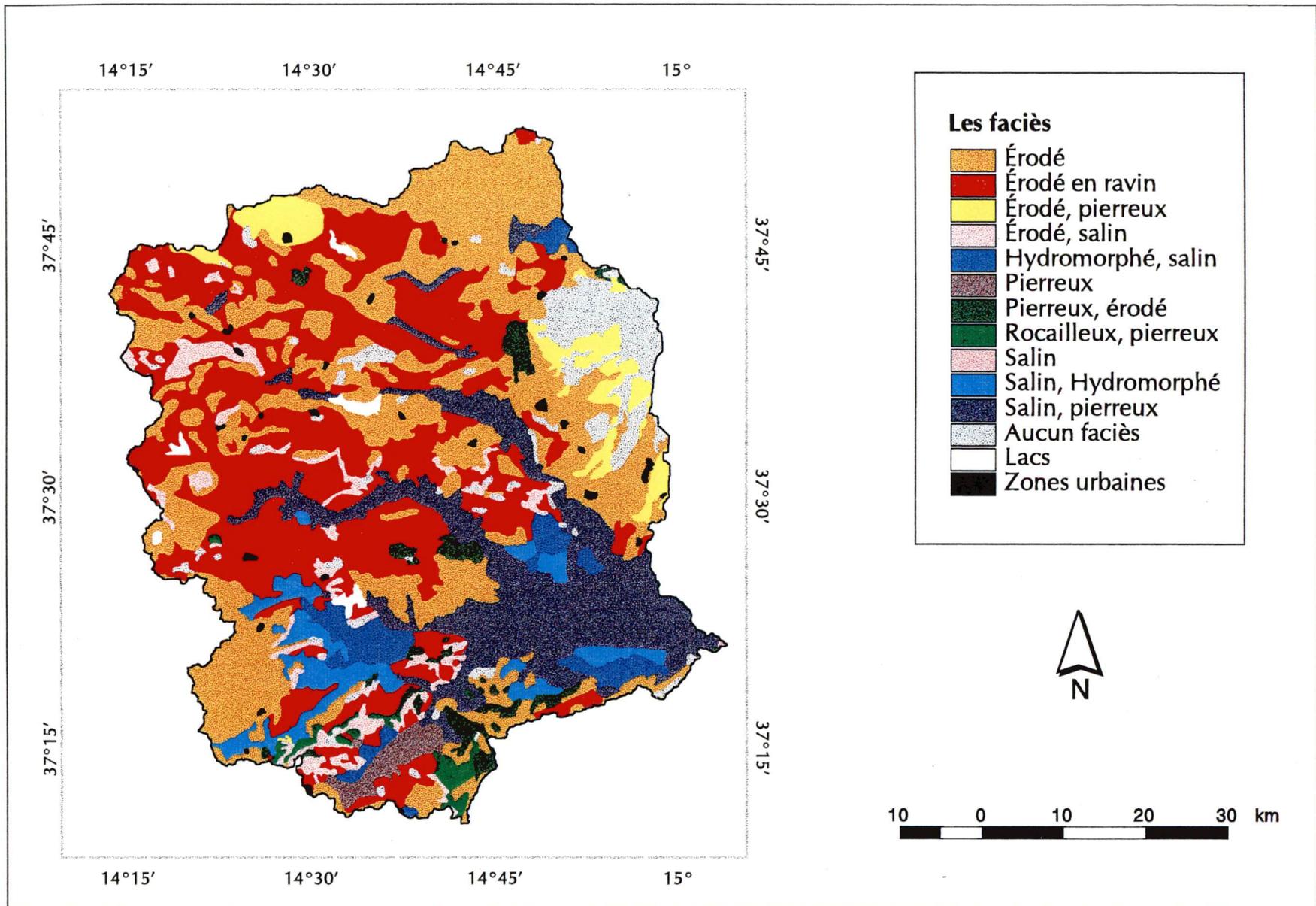


Figure 18: Carte des différents faciès

réalisée par: Annie Clark

7.2. Analyse de correspondance

Afin d'identifier les unités de paysage, les cartes produites ont été mises en relation les unes avec les autres pour effectuer une analyse de correspondance entre les différentes conditions du milieu. Il est important de noter que le niveau de précision de la classification des unités de paysage présentes sur le bassin versant du Simeto dépend de l'échelle utilisée (1 : 500 000). À ce niveau de perception, un cm² de la carte représente 25 km² sur le terrain. Le bassin du Simeto possède un paysage hétérogène, il est donc difficile d'atteindre un niveau d'homogénéité acceptable.

Ainsi, à l'aide d'une série d'histogrammes par zones, de vastes unités de paysages comportant des conditions similaires ont été identifiées. L'analyse de ces histogrammes a démontré que les variables écologiques les plus actives à cette échelle sont données par la nature, l'origine et la forme des matériaux géologiques de surface. En d'autres mots, ce sont les grands ensembles géomorphologiques et géologiques qui affectent les autres ensembles. Le relief s'est façonné selon le type de substrat en place. À son tour, le relief a une influence sur le système pluviométrique. De même, les sols et les types de couverts varient dans l'espace suivant les ensembles géomorphologiques. Six unités de base ont donc été identifiées suivant les zones lithologiques : les régions d'accumulation alluviale, les régions argileuses, les régions de calcaire, les régions volcaniques, les zones de séquences de flyschs et les zones de séries de gypse-sulfurifère (figure 19 et tableau 8).

Tableau 8: Caractéristiques des unités de paysage

Unités de paysage	Altitude moy. (m)	Pente moy. (%)	Pluies moy. annuelles (mm)
Zones d'accumulation alluviale	150	6	466
Zones argileuses	500	17	568
Zones de calcaire	496	24	572
Zones volcaniques	813	17	700
Zones de séquences de flyschs	816	23	680
Zones de gypse-sulfurifère	816	23	680

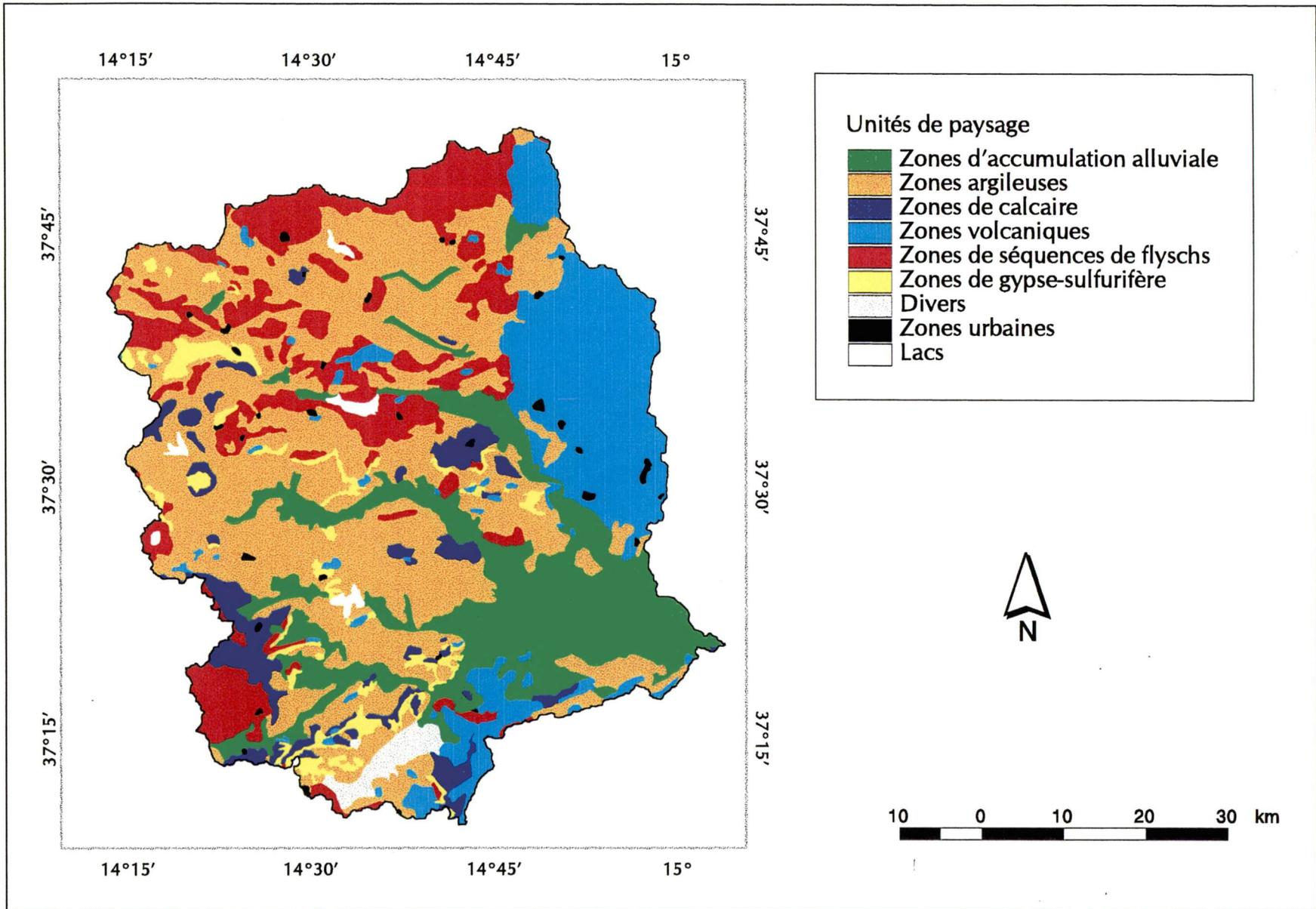


Figure 19: Carte des différents unités de paysage

réalisée par: Annie Clark

7.2.1. Paysage 1 : les zones d'accumulation alluviale

Les zones d'accumulation alluviale se situent dans les plaines et les lits de rivières. Elles sont caractérisées par une topographie plane (pente inférieure à 8 %). On retrouve un climat semi-aride où les eaux de pluies s'évaporent rapidement. Les voies de transport sont plus carrossables que dans les régions de collines et l'eau y est disponible par irrigation. La présence de sols de dépôts élevés en matière organique et d'une nappe phréatique font de ces régions des endroits prospères où l'on retrouve de riches plantations d'agrumes (figure 20). Toutefois, ces sols fertiles sont affectés par le sel. Une surexploitation de la nappe phréatique empêche celle-ci de refaire ses réserves en eau douce. C'est souvent de l'eau saline qui est utilisée pour irriguer les terres.



(Poulin, 1997)

Figure 20: Plantations d'agrumes dans la plaine de Catane

7.2.2. Paysage 2 : les zones argileuses

Les secteurs argileux dominent le paysage. Plus de 40 % de la surface du bassin est en sol argileux. Ce sont des endroits situés dans les collines, entre 250 et 800 m d'altitude, sur des pentes supérieures à 8 %. Ces collines argileuses sont caractérisées par des paysages de glacis et des terrasses cultivées en céréales où une forte exploitation agricole a entraîné l'appauvrissement des terres (figure 21). Sur ces dernières, il est possible de distinguer des entailles d'érosion vives ou bien des zones à solifluxion active (figure 22). C'est également le pays des moutons. On y retrouve des pâturages sur une grande superficie qui sont fort dégradés (figure 23). Les chemins sont endommagés. Quelques fois, la route est coupée dû à un glissement. Ainsi, plus la pente devient abrupte, plus il est difficile d'avoir un certain contrôle sur ces glaises si répandues.



(Poulin, 1997)

Figure 21: Collines de l'intérieur



Figure 22: Entailles d'érosion



Figure 23: Pâturage dégradé

7.2.3. Paysage 3 : les zones de calcaire

Les secteurs de calcaire sont moins nombreux. Fortement érodés, ces anciens plateaux autrefois recouverts d'une forêt de chênes verts ont aujourd'hui un aspect dégradé. Les pentes sont abruptes, le sol est très pauvre et la forêt a fait place à une garrigue (figure 24). À Centuripe, les ingénieurs forestiers tentent de retenir le sol en reboisant avec du lin. Par contre, ce ne sont pas tous les versants qui ont un aspect désertique, il existe plusieurs versants cultivés en terrasses (figure 25).

7.2.4. Paysage 4 : Les zones volcaniques

Les zones volcaniques se divisent en deux régions soit celle qui se situe en bordure de l'Etna et celle des roches volcaniques plus anciennes en bordure nord et sud du bassin. Au pied de l'Etna, les pentes sont faibles à moyennes. Ce sont des zones à forte pierrosité (figure 26). On y retrouve une agriculture non-irriguée (vignobles, oliveraies) et une végétation plutôt de type désertique. La vigne est maîtresse sur les abords de l'Etna. L'érosion y est minime, car le sol est poreux, l'eau s'y infiltre, donc ruisselle très peu. Sur les roches volcaniques plus anciennes, l'eau s'infiltre moins donc ces endroits sont plus érodés. Les pentes sont plus abruptes. Par contre, ce sont également des oliviers et des vignes qui caractérisent ces régions.

7.2.5. Paysage 5 : Zones de séquences de flyschs

Les séquences de flyschs sont des ensembles de couches sédimentaires de natures différentes qui se succèdent dans un ordre déterminé (Foucault et al, 1984). Ce sont des blocs de tailles très diverses enveloppés d'une matrice argileuse. Ces zones sont situées en haute altitude. Au nord du bassin, elles sont caractérisées par des pentes fortes, elles sont recouvertes d'une forêt peu dense de chênes verts. Tandis que les autres zones de séquences de flyschs ont été atteintes par l'érosion. Les blocs de calcaire ont été mis à découvert (figure 27). Étant donné, la structure argileuse qui caractérise ces flyschs, on retrouve des zones de céréales et de pâturages au pied des blocs rocheux.



Figure 24: Paysage fort dégradé dans la région de Centuripe



Figure 25: Cultures en terrasses dans la région de Centuripe



(Clark, 1997)

Figure 26: Paysage en bordure de l'Etna (coulée de lave colonisée par la végétation)



(Poulin, 1997)

Figure 27: Séquences de flyschs (région de Troina)

7.3. Analyse du paysage à travers le modèle à l'aide de requêtes

Cette dernière analyse avait comme objectif d'identifier les unités de paysage où il est possible ou non possible de modéliser les pertes de sols à l'aide du modèle USLE. Toutefois, les unités de paysage identifiées forment un maillage imprécis. À l'intérieur de chaque unité, il est possible de rencontrer des comportements érosifs différents. Ainsi, nous avons interrogé la base de données cartographique pour réaliser une carte représentant les zones applicables et non applicables par l'USLE. Pour ce faire, différentes requêtes ont été énoncées selon les contraintes du modèle USLE et posées à la base de données (*Map query*). Considérant que l'USLE ne s'applique pas sur des pentes supérieures à 18 %, qu'elle ne considère pas l'érosion en ravins et qu'elle ne permet pas d'estimer les pertes de sols en milieu irrigué, on a formulé les requêtes suivantes :

1. Quelles sont les zones comportant des pentes de plus de 18 % ?
2. Quelles sont les zones où il y a une grande proportion d'érosion par ravinements ?
3. Quelles sont les zones de plantations irriguées ?
4. Quelles sont les zones de roches nues (sans sol) ?

Chaque requête a été présentée sous forme de carte, puis l'ensemble des requêtes a été regroupé en une seule carte (figure 28). Par la suite, cette carte a été mise en relation avec la carte des unités de paysage, ce qui a permis d'identifier le type de paysage où les résultats de pertes en terre peuvent être régionalisées sans entraîner trop d'erreurs.

Ainsi, l'analyse du paysage à travers les limites du modèle a montré qu'il n'est pas approprié d'appliquer l'USLE sur près de 50 % de la superficie du bassin (figure 29). Il est possible d'appliquer l'USLE sur les zones d'accumulation alluviale, car les pentes sont faibles. Les conditions du milieu sont homogènes. Par contre, il n'est pas possible de l'appliquer dans les secteurs où il y a présence d'infrastructures d'irrigation.

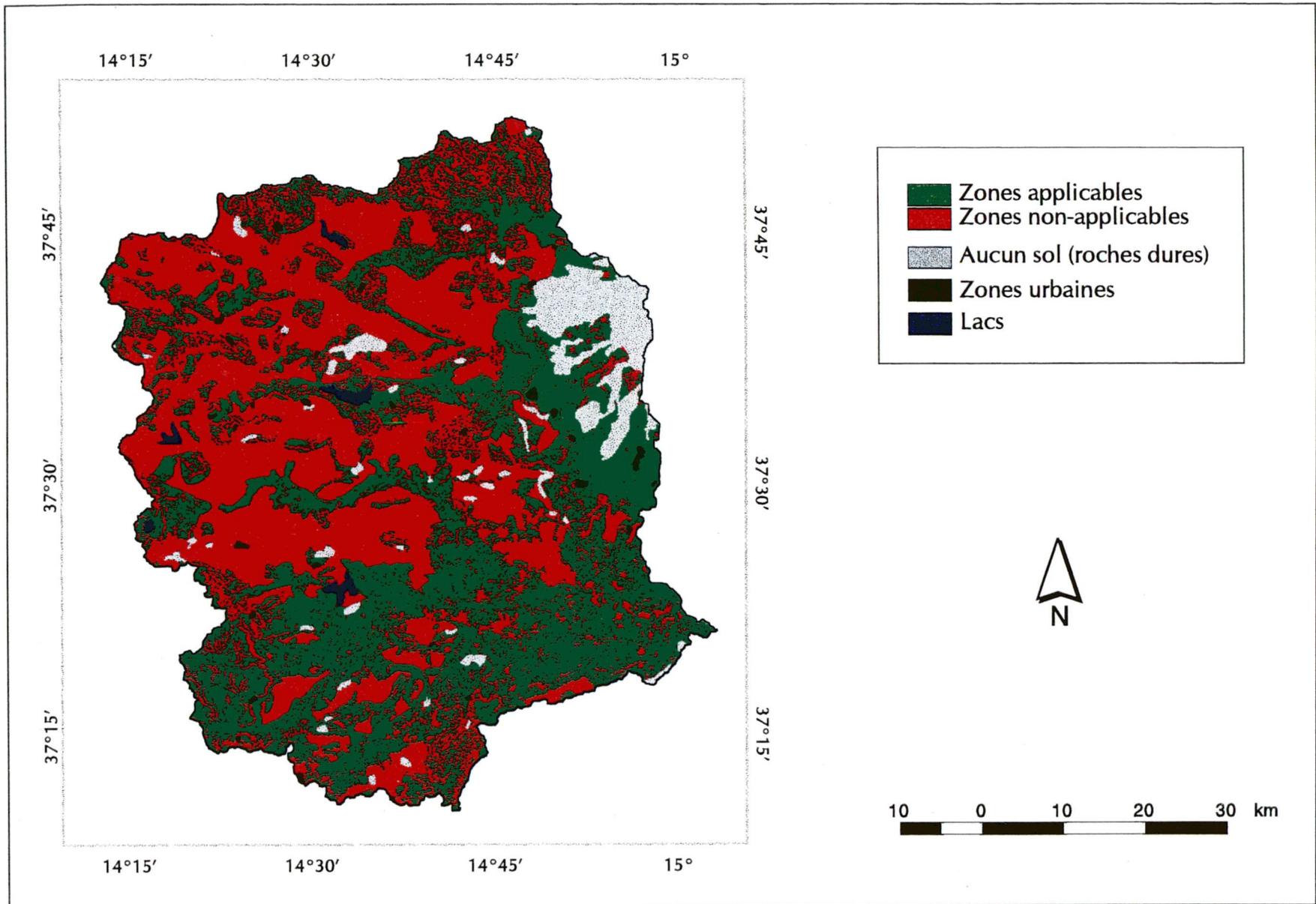


Figure 28: Carte des zones d'applicabilité du modèle USLE

réalisée par: Annie Clark

L'USLE n'en tient pas compte. Le modèle doit donc être ajusté pour être utilisé selon ce type de condition. Dans les régions d'argile, la modélisation des pertes de sols à l'aide de l'USLE est difficile. L'USLE considère le ruissellement diffus, mais il ne considère pas le ravinement. Plus de la moitié de la superficie de ces régions est affectée par l'érosion en ravins. Ainsi, dans ces régions, l'application de l'USLE est possible dans les zones de cultures céréalières. Par contre, il n'est pas possible de l'appliquer sur les zones de pâturages où le piétinement des animaux rend le sol sensible à l'érosion. Étant donné la topographie du terrain, l'application du modèle USLE est quasiment impossible dans les secteurs de calcaire et de séquences de flyschs. L'USLE ne s'applique pas sur des pentes supérieures à 18 %. Il est possible d'appliquer le modèle de façon locale sur les plateaux ou dans le bas des versants, mais il est impensable de modéliser les pertes de sols sur toute la zone. En milieu volcanique, le sol est absent à plusieurs endroits, il n'est donc pas approprié de modéliser dans ces régions rocailleuses. Par contre, il est possible d'utiliser l'USLE au pied de l'Etna. À cet endroit, il y a une mince couche de sol et les pentes sont faibles.

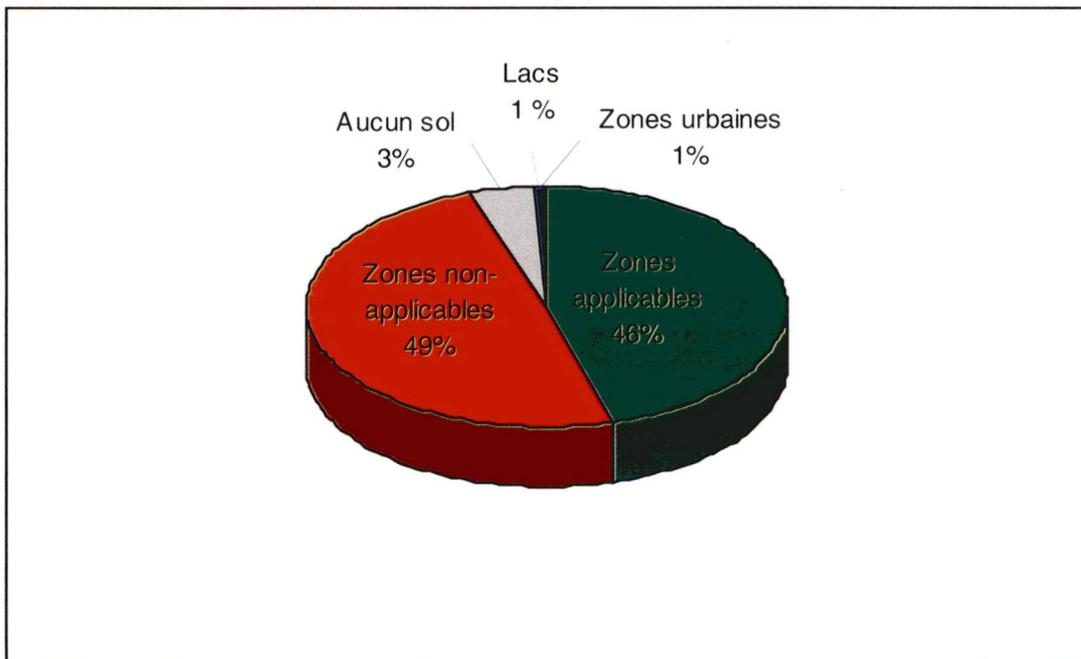


Figure 29: Zones d'applicabilité de l'USLE

8. Interprétation des résultats

8.1. Améliorations par rapport aux travaux antérieurs

Plusieurs études ont démontré l'apport de la télédétection et des SIG pour l'étude des phénomènes de surface (Cihlar, 1987 ; Anys, 1991 ; Fabbri, 1991 ; Vogt, 1992 ; Valério Filho, 1993). La plupart de ces études ont porté sur l'intégration des paramètres commandant l'érosion des sols à l'aide d'un SIG en utilisant l'USLE. Par la suite, la tendance a été de critiquer l'USLE et de lui trouver un outil de remplacement en proposant d'autres modèles. Toutefois, les problèmes liés à la modélisation des pertes de sols à l'aide de la télédétection et des SIG se trouvent au niveau des échelles de perception. L'extrapolation des résultats de pertes de sols à des échelles plus petites requiert une certaine prudence, car l'estimation des pertes de sols sur de grandes étendues se fait difficilement dû à la diversité spatiale du paysage. Ainsi, à l'aide de cette étude, on a essayé de fournir un protocole de recherche simple et efficace pour le suivi de l'érosion hydrique à l'échelle du paysage, de la région ou même du pays. L'étude confirme que l'identification d'une mosaïque d'unités de paysage selon des ensembles géomorphologiques, physiographiques, pluviométriques et d'occupation du sol sur lesquelles il est possible ou pas possible d'appliquer des modèles de pertes de sols comme USLE peut éviter des aménagements peu représentatifs du paysage érodé et permettre un usage prolongé du territoire.

8.2. Limites et faiblesses de l'étude

Il est difficile de vérifier l'exactitude des résultats obtenus sans procéder à une modélisation des pertes de sols à l'aide de l'USLE. Une vérification des résultats obtenus avec des estimations de pertes de sols calculées en différents points sur le bassin serait en mesure de valider la méthode et de déterminer si la classification des paysages permet d'appliquer un modèle de pertes de sols validé localement à des échelles plus petites.

Cette étude possède également quelques lacunes au plan méthodologique. Le bassin du Simeto est un grand bassin versant possédant un ensemble complexe d'unités de paysages. La résolution utilisée (30 m) pour effectuer la cartographie des types de couverts entre en conflit avec cette forte hétérogénéité. L'analyse des paysages méditerranéens devrait se faire à plus fine résolution. De plus, la variable écologique la plus active au niveau de perception utilisé dans cette étude est donnée par la géomorphologie (nature, origine et forme de matériaux géologiques de surfaces), ce niveau offre une classification trop grossière du paysage pour une étude modélisée portant sur l'érosion hydrique en milieu méditerranéen. Celle-ci demande une précision plus fine au niveau de la structure du sol et du couvert. Ainsi, la réduction de l'information, c'est-à-dire le passage de l'hétérogénéité à l'homogénéité, doit être envisagée en fonction du phénomène étudié.

8.3. Conclusion face aux hypothèses et aux objectifs

Cette étude vise à mettre en évidence une mosaïque d'unités de paysage selon des critères géomorphologiques, physiographiques, pluviométriques et d'occupation du sol sur lesquelles il est possible ou pas possible d'appliquer le modèle de pertes de sols l'USLE. Pour y parvenir, nous devons construire une base de données sous la thématique de l'érosion hydrique à l'aide de la cartographie écologique, des SIG et de l'imagerie satellitaires. Par la suite, on doit identifier les différentes unités de paysage selon les caractéristiques du territoire et localiser les zones où il est possible d'appliquer l'USLE.

Suite à cette démarche, il nous est possible de relever qu'il est difficile d'appliquer l'USLE à de petites échelles lorsque le paysage est composé d'une mosaïque complexe d'unités possédant des caractéristiques physiques différentes et un comportement qui diffère en termes d'érosion. La modélisation des pertes de sols sur un paysage complexe doit être faite à plus grande échelle. Cette affirmation est moins vraie lorsque nous sommes en présence d'une vaste région agricole comme celle des prairies dans l'Ouest canadien. Ce paysage possède une certaine continuité qui permet d'estimer les pertes de sols à une échelle plus petite. Ainsi,

selon le type de paysage rencontré, les modèles de pertes de sols ne s'appliquent pas à la même échelle. De plus, le choix du modèle de pertes de sols est important. Les modèles de pertes de sols ne peuvent être valables pour tous les types de paysage. Il est important de tenir compte des conditions du milieu. L'estimation des pertes de sols doit donc être fait sur des unités homogènes dont les attributs respectent les limites du modèle utilisé. Ainsi, la validité et la précision de l'applicabilité des modèles de pertes de sols requièrent une bonne connaissance du paysage.

8.4. Implications possibles de l'étude

À la lumière de ces résultats, la représentation de l'hétérogénéité spatiale d'un vaste bassin versant dans le cadre d'un SIG permet de mieux comprendre la complexité du paysage et incite à la prudence vis-à-vis de la généralisation trop rapide des modèles de pertes de sols sur de grandes étendues. Cette étude offre donc une vision qualitative pour un programme de conservation des sols. Elle fournit également une documentation complète sur support informatique du bassin versant du Simeto, Sicile, Italie qui pourra servir à d'autres études. Une multitude de manipulations peuvent être effectuée au sein du SIG. Par exemple, on pourrait étudier l'effet du relief sur les fortes précipitations ou bien identifier des indices bien précis de diversité du paysage

9. Conclusion

La représentation de l'hétérogénéité spatiale du paysage sous une problématique de l'érosion hydrique peut éviter d'extrapoler les résultats de pertes de sols trop rapidement. L'analyse du paysage à travers les conditions du modèle utilisé permet d'appliquer les modèles de pertes de sols de façon plus précise.

L'utilisation de la cartographie écologique pour effectuer la classification des paysages est une façon efficace pour acquérir des connaissances sur le paysage et analyser l'organisation spatiale de celui-ci. Elle fournit une synthèse portant sur les caractéristiques d'unités de paysage. Il n'y a qu'un inconvénient, c'est qu'elle implique un grand nombre de données d'entrées. Par contre, l'utilisation des SIG et de l'imagerie satellitaires s'avère d'une grande efficacité. Les SIG sont des outils de gestion et de cartographie très puissants, tandis que la télédétection est très intéressante au niveau de l'acquisition des données spatiales et temporelles. Le développement des SIG et de la télédétection ne cesse de s'accroître. Il devient donc intéressant de jumeler la cartographie écologique à ces outils dans le cadre d'une étude portant sur la modélisation des pertes de sols.

La méthode présentée dans ce mémoire de recherche offre donc une approche qualitative intéressante pour une étude de modélisation des pertes de sols. Une analyse qualitative du paysage permet d'atteindre une meilleure précision lors d'une étude quantitative. Ce type d'étude peut être également crucial au niveau de la gestion du territoire. Pour effectuer une bonne gestion, les décisions doivent être prises à un niveau global (échelle du bassin versant par exemple), car un problème local peut avoir des répercussions au niveau régional.

Ainsi, une base de cartes existe relative au bassin versant du Simeto, Sicile. La méthode semble efficace. Il serait donc intéressant d'améliorer cette étude en effectuant la modélisation des pertes de sols. Ceci permettrait de créer des scénarios d'interventions humaines sur le milieu et de simuler les impacts à long terme. Le calcul d'indices de diversité permettrait également de compléter le volet d'hétérogénéité du paysage.

10. Références

Ait Fora, A. (1995) Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments, Thèse de doctorat en télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 251 p.

Anys, H. (1991) Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant d'Oued Aricha, (Settat, Maroc). Mémoire de maîtrise. Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 83 p.

Beasley, D.B., Huggins, L.F. et Monke, E.J. (1980) ANSWERS : a model for watershed planning. Transactions of the american society of agricultural Engineers, vol. 23, p. 938-944.

Beasley, R.P. (1972) Erosion and sediment pollution control. The Iowa State University Press, Ames, 320 p.

Bonn, F., Cyr, L., Anys, H. et Chakroun, H. (1994) Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. *in* Bonn, F. (dir.) Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Presses de l'Université du Québec, Montréal, p. 75-97.

Bonn, F. (1998) La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, n° 3, vol. 9, p. 1-8.

Chakroun, H. (1993) Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique. Mémoire de maîtrise. Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 94 p.

Cihlar, J. (1987) A methodology for mapping and monitoring cropland soil erosion. *Canadian journal of soil science*, n° 67, p. 433-444.

Company-Redmond, A. (1996) Images SAR : Possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (Modélisation et Expérimentations). Thèse de doctorat. Laboratoire Géosol. Sciences de la terre. Université de Bourgogne, Dijon. 254 p.

De Jong, S. M. (1994) Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a mediterranean environment. Faculteit des Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit, Utrecht, 360 p.

De Noni, G. et Viennot, M. (1996) La cartographie de l'érosion en Équateur : intérêt de l'approche dans un programme de conservation des sols. Réseau Érosion : États de surface du sol et risques de ruissellement et d'érosion. Bulletin no. 16, p. 310-323.

Demangeot, J. (1996) Les milieux naturels du globe. Masson & Armand Colin, 6^e éd., Paris, 337 p.

De Roo, A.P.J. (1993) Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical informations systems. Validity and applicability of the ANSWERS model in two catchments in the loess area of south Limburg (The Netherlands) and in Devon (UK). Nederlandse Geografische studies n° 157.

Derruau, M. (1988) Précis de géomorphologie. Édition Masson, Paris. 533 p.

Dion, F. (1989) Modélisation cartographique de la perte de sol: application de l'équation universelle de perte de sol adaptée aux pentes complexes sur un système d'information géographique en mode *raster*. Mémoire de maîtrise. Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 185 p.

Douglas, I. (1976) Erosion rates and Climate : geomorphological implications. *in* Derbyshire, E. (dir.) Geomorphology and climate. John Wiley & sons, New York, p. 269-287.

Ellison, W.D. (1952) Raindrop energy and soil erosion. *Empirical Journal of Ecperimental Agronomy*, vol. XX, p. 81-97.

Fabbri, K. P. (1991) The use of geographic information systems and remote sensing analysis for the assessment of soil erosion hazard : a case study in central Bolivia. Master of science in soil survey at the international institute for aerospace surveys and earth sciences, ITC, Enschede, Netherlands. 142 p.

Fierotti, G., Dazzi, C., Raimondi, S. (1988) La carte des sols de la Sicile à l'échelle du 1 : 250 000. Université des études de Palerme, Institut d'agronomie générale et de pédologie.

Girbas, J. (1997) La Sicile. GEO, no 220, p. 94-134.

Hill, J., Mégier J. and Mehl, W. (1994) Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. Remote Sensing Review, vol. 12, p. 107-130.

Hureau, J. (1979) La Sicile aujourd'hui. Éditions J. A., Paris, 240 p.

Jurdant, M. ; Bélair, J. L. et Gérardin, V. (1975) Concepts méthodologiques pour la classification et l'inventaire écologique du territoire québécois. Étude réalisée pour le conseil de la recherche et du développement forestiers. Rapport n° 5, 55 p.

Lal, R. (1988) Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, Iowa, 244 p.

Minacapili, M. (1996) Modelli matematici e GIS per la valutazione dell'erosione idrica nei bacini idrografici. Thèse de doctorat, Université des études de Palerme, 212 p.

Morgan, R.P.C. (1995) Soil erosion & conservation. John Wiley & Sons, New York, 198 p.

Neboit, R. (1990) Les contraintes physiques et la fragilité du milieu méditerranéen. Annales de géographie, n° 551, p. 1-20.

Odum, E. P. (1971) Fundamentals of Ecology. Saunders, Philadelphia, 3rd ed, 254 p.

Ozenda, P. (1986) La cartographie écologique et ses applications. Collection écologique appliquée et sciences de l'environnement. Masson, Paris, 190 p.

Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C. and McCool, D.K. (1994) RUSLE revisited : status, questions, answers and the future. Journal of soil and water conservation. Vol. 49, n° 3, p. 213-220.

Robeson, S. M. (1993) Spatial interpolation network, and terrestrial air temperature variability. Climatology, vol. XLVI, n° 1, p. 10-19.

Robitaille, A. (1990) La cartographie des districts écologiques : concepts, objectifs, méthodes et produits. Ministère de l'énergie et des ressources, service des inventaires forestiers, division cartographie, 13 p.

Rocheffort, R. (1961) Le travail en Sicile : étude de géographie sociale. Presses universitaires de France, Paris, 363 p.

Salvatore, I. (1989) Fiume Simeto : étude hydrologique. Rapport de recherche, Université des études de Catane, 410 p.

Smith, R. L. (1990) Ecology and field biology, 4th edition, Harper Collins Publishers, 922 p.

Tomasi di Lampedusa, G. (1959) Le guépard. Les éditions du Seuil, Paris. 250 p.

Tricart, J. (1969) Le modelé des régions sèches. In Tricart, J. et Cailleux, A. (dir.) Traité de géomorphologie. Société d'édition d'enseignement supérieur, Paris, 472 p.

Valério Filho, M. ; Donzeli Luiz P. and Pinto, S.A.F. (1993) Remote sensing and data integration to evaluate the potential soil erosion and land capability. Presented at the 25th International Symposium, Remote Sensing Global Environmental Change, Graz, Austria, 4-8 avril, 759-765 p.

Voet, P. ; Diepen, C.A. en Voshaar, J. O. (1994) Spatial interpolation of daily meteorological data. A knowledge-based procedure for the region of the European Communities. Report 53.3, Wageningen, The Netherlands, 105 p.

Vidal de la Blache, P. et Gallois, L. (1934) Géographie Universelle. Tome VII, Méditerranée et péninsules méditerranéennes. Librairie Armand Colin, Paris. 500 p.

Vogt, T. et Gomer, D. (1992) Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG : intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain. Conférence Européenne de l'année spatiale internationale, Munich, 2 avril, bulletin S.F.P.T. n° 128, session n° 4, p. 7-17.

Wischmeier, W. H. (1976) Cropland erosion and sedimentation. Control water pollution from cropland. United States Department of agriculture (USDA), Washington, D.C. Vol. 2, p. 31 -52.

Wischmeier, W.M., et Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, n° 282, United States Department of agriculture (USDA), Washington, D.C, 58 p.

Zonneveld, I.S. (1987) Landscape ecology and its application. *in* Moss, M.R. (dir.) Landscape ecology and management. Publications inc., Montréal, p.3-15.

Annexe 1 - Données d'intensités pluviométriques (1960-1988)

Intensités pluviométriques extrêmes (1960-1988)

NO	Stations météorologiques	Date	Durée (min.)	Quantité	Intensité
130	MONTALBANO_ELICONA	17-02-74	10	18,40	110
2590	LENTINI(BONIFICA)	19-10-62	40	51,80	78
2630	CHIUSITTA	01-10-84	50	35,80	43
2660	MANIACI	08-08-88	15	18,00	72
2690	CESARO	13-10-79	20	35,60	107
2730	BIVIERE	04-09-67	60	38,60	39
2750	TROINA	25-10-76	120	110,00	55
2780	MALETTO	24-05-75	20	13,80	41
2790	BRONTE	01-10-84	15	27,00	108
2790	BRONTE	24-08-68	10	18,40	110
2800	NICOSIA	09-06-79	20	30,40	91
2810	CAPAZZI	30-07-63	60	114,40	114
2830	CERAMI	08-09-67	30	43,20	86
2840	GAGLIANO_CASTELFERRATO	23-09-75	50	32,60	39
2860	AGIRA	24-05-75	30	18,60	37
2870	RAGALNA	23-02-74	80	22,60	17
2880	CENTURIFE	10-11-87	30	30,00	60
2900	ADRANO	12-08-88	10	18,00	108
2900	ADRANO	22-12-72	15	37,60	150
2920	BELPASSO	12-11-84	60	66,20	66
2940	LEONFORTE	01-10-84	20	35,20	106
2940	LEONFORTE	26-07-63	20	37,20	112
2950	NICOLETTI(DIGA)	15-09-88	20	13,00	39
2960	VALGUARNERA	23-08-87	50	43,40	52
2970	TORRICCHIA	08-08-88	25	34,40	83
2980	CATENANUOVO	10-11-87	50	56,40	68
3000	RADDUSA	25-08-78	30	39,20	78
3010	DON_STURZO(DIGA)	17-01-87	20	15,40	46
3020	AIDONE	03-09-81	20	28,40	85
3030	MIRABELLA_IMBACCARI	19-09-84	20	22,20	67
3050	CALTAGIRONE	22-10-88	30	13,00	26
3050	CALTAGIRONE	05-10-71	30	29,80	60
3050	CATANIA(G.C.OO.MM.)	23-08-76	60	65,00	65
3060	MINEO	28-09-83	15	33,60	134
3070	RAMACCA	06-02-67	15	27,60	110
3165	CATANIA(IST.AGRARIO)	12-11-84	30	37,40	75
3170	CATANIA(G.C.OO.MM.)	16-03-85	30	45,80	92
6109	SCAVONE(CASE)	30-07-63	40	50,60	76
6203	CATANIA(OSSERVATORIO)	29-09-64	40	68,60	103
6203	CATANIA(OSSERVATORIO)	20-10-72	30	57,20	114
6227	BUFFALI(CASE)	30-07-63	60	55,40	55
6233	SIMETO(STAZIONE)	13-10-65	60	88,80	89
6234	SECRETO(TELEFERICA)	17-10-69	20	24,00	72

Annexe 2 - Image TM infrarouge du capteur Landsat



**Image en couleur infrarouge
(TM4, TM5 et TM3)**



Image acquise par le capteur Landsat TM le 10 août, 1985