

# LUTTE CONTRE LA SÉCHERESSE ET LA DÉSERTIFICATION



## Projet Pilote Activités et résultats en Sicile



Dipartimento di Ingegneria Idraulica  
ed Applicazioni Ambientali  
Università di Palermo



Dipartimento di Ingegneria Civile  
ed Ambientale  
Università di Catania



Dipartimento di Colture Arboree  
Università di Palermo



Dipartimento di Agronomia  
Ambientale e Territoriale  
Università di Palermo



Dipartimento di Ingegneria  
e Tecnologie Agro-Forestali  
Università di Palermo



## INDEX

Chapitre 1 -	Préambule .....	1
Chapitre 2 -	Le changement climatique .....	4
2.1	Les changements climatiques .....	4
2.1.1	Les changements de la température à échelle globale .....	6
2.1.2	Changements des précipitations à l'échelle globale .....	14
Chapitre 3 -	Le phénomène de la désertification .....	23
3.1	Zones de la terre concernées par la désertification .....	24
3.2	Les causes de la désertification .....	29
3.2.1	Facteurs prédisposants .....	29
3.2.2	Causes naturelles .....	29
3.2.3	Causes anthropiques .....	31
Chapitre 4 -	Caractérisation des processus de sécheresse et de désertification à l'échelle régionale.....	39
4.1	Données .....	39
4.2	Méthodologies .....	40
4.2.1	Test de vérification de l'existence d'une tendance .....	40
4.2.2	Test à échelle zonale .....	41
4.3	Analyse des tendances des séries de précipitation (1921-2000).....	42
4.4	Analyse des tendances des séries de température (1924-2006).....	54
4.5	Analyse des tendances des indices climatiques (1924-2000).....	61
4.6	Observations sur les résultats .....	68
4.7	Rédaction de bilans hydrologiques, même à l'échelle régionale .....	69
Chapitre 5 -	Lignes directrices d'identification de mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification et réalisation d'une intervention de présentation de prévention et de mitigation.....	86
5.1	Vulnérabilité à la sécheresse et à la désertification dans la zone d'examen .....	87
5.1.1	Propositions d'interventions .....	91
5.1.1.1	Analyse de sources d'eau complémentaires .....	92
5.1.1.2	Techniques de lutte contre la salinisation du sol .....	95
5.1.1.3	Recyclage des eaux usées urbaines épurées à des fins d'irrigation.....	102
5.1.1.4	Utilisation d'eaux dessalées .....	105
5.2	Enquête expérimentale sur les effets d'eaux saumâtres et d'eaux de pluie sur la productivité de cultures en serres.....	107
5.2.1	Matériels et méthodes .....	108
5.3	Résultats .....	119
5.4	Conclusions .....	131
Chapitre 6 -	Rôle du boisement dans la mitigation des processus de desertification.....	132
6.1	Zone d'étude .....	132
6.2	Ressources forestières à l'intérieur de la zone étudiée .....	138
6.3	Résultats .....	144
6.3.1	Carte de l'utilisation du sol à l'échelle 1:25.000.....	144
6.3.2	Caractérisation des peuplements forestiers et préforestiers .....	148
6.3.2.1	Forêts d'eucalyptus .....	149

	6.3.2.2 Pinèdes .....	153
	6.3.2.3 Forêts mixtes.....	158
	6.3.2.4 Fourrés thermophiles .....	162
6.4	Degré de désertification du bassin .....	165
6.5	Lignes directrices de gestion forestière pour la mitigation des processus de désertification.....	166
	6.5.1 Types d'intervention .....	170
	6.5.2 Lignes directrices pour les opérations de reboisement .....	173
Annexe	6.1 – Organisation hiérarchique des types d'utilisation du sol selon le système CLC.....	177
Annexe	6.2 – Carte de l'utilisation du sol des systèmes agricoles .....	180
Annexe	6.3 – Carte de l'utilisation du sol des systèmes forestiers (détail échelle 1:100.000).....	181
Annexe	6.4 - Carte de l'utilisation du sol des systèmes forestiers (détail échelle 1:250.000).....	182
Annexe	6.5 – Carte des zones vulnérables au risque de désertification en Sicile .....	183
Annexe	6.6 – Carte du risque de désertification du bassin de l'Imera méridional .....	184
Annexe	6.7 – Carte du risque de désertification des systèmes forestiers et préforestiers du bassin de l'Imera méridional .....	185
Chapitre 7 -	Monitoring de la salinité du sol suite à l'irrigation avec des eaux à degré de salinité divers.....	186
7.1	Introduction .....	186
7.2	La proposition d'enquête .....	187
7.3	Matériels et méthodes .....	189
7.4	Le sol objet d'enquête .....	192
7.5	Les résultats du monitoring .....	195
	7.5.1 Les eaux d'irrigation .....	198
	7.5.2 Le sol .....	205
7.6	Conclusions .....	214
Chapitre 8 -	Identification des zones sensibles à la désertification en Sicile du point de vue de la qualité du climat et du sol.....	222
8.1	Méthodologies, temps et phases de la recherche sur le bassin du Fleuve Imera méridional.....	222
8.2	Résultats.....	223
	8.2.1 Détermination de la contribution érosive rill dans le calcul de la perte de sol globale.....	223
	8.2.2 Analyse de l'influence du facteur topographique sur la perte de sol.....	232
8.3	Détermination du facteur d'érodibilité, du facteur climatique et de l'érosion potentielle pour le bassin du fleuve Imera méridional.....	241
8.4	Détermination de l'indice de qualité du sol pour le bassin du fleuve Imera méridional.....	257
8.5	Détermination de l'indice de qualité du climat pour le bassin du fleuve Imera méridional.....	270
8.6	Détermination des zones sensibles à la désertification pour le bassin du fleuve Imera méridional.....	274
Annexe	8.1 – Données caractéristiques des 228 échantillons prélevés pour détermination du facteur d'érodibilité du sol.....	276
Bibliographie	.....	286



## ***Chapitre 1 - Préambule***

***Ingénieur Giuseppe Geraci, Ingénieur Gianluca La Placa  
Bureau Régional pour les Ordures et les Eaux – Secteur Observatoire des Eaux***

Cette publication recueille les expériences, les études et les recherches effectuées dans le cadre de l'Accord de Programme entre le Ministère de l'Environnement, la Protection du Territoire et de la Mer (MATTM), le Comité National de Lutte contre la Sécheresse et la Désertification (CNLSD) et l'Agence Régionale pour les Déchets et les Eaux - Secteur Observatoire des Eaux de la Région Sicile pour promouvoir des actions régionales de lutte contre la désertification grâce à un financement de projets pilotes pour les cinq régions italiennes considérées à plus grand risque de désertification (Basilicate, Calabre, Pouilles, Sardaigne et Sicile).

Dans le cadre de cet Accord, l'Observatoire des Eaux est intervenu avec l'élaboration d'un "Projet Pilote de lutte contre la sécheresse et la désertification" en Sicile, approuvé lors de la séance du 3 Mai 2007 par le CNLSD, pour approfondir, au moyen d'études applicatives, les aspects concernant le problème de la mitigation des effets négatifs liés à la désertification; dans ce but, le projet a été structuré de façon à avoir des retombées de grande importance sur le territoire et à servir d'orientation et de support aux Administrations Locales pour la gestion des ressources ainsi que pour la sauvegarde et la protection du territoire.

Le but spécifique du projet, en particulier, concernait la mise au point de lignes directrices pour l'individuation de mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification, la réalisation d'une intervention expérimentale et démonstrative de prévention et de mitigation, ainsi que la diffusion, dans la mesure plus ample possible, de connaissances technico-scientifiques sur les thèmes concernant les phénomènes de sécheresse et de désertification.

Les activités prévues du projet visent à intégrer la dimension environnementale dans le processus de développement du territoire et visent, en outre, à contribuer à la lutte contre la désertification et à la préservation de la biodiversité

locale au moyen de mesures pour sauvegarder, valoriser et développer rationnellement et de façon durable les ressources.

Ces activités ont été poursuivies en adoptant des solutions technologiques et des méthodologies de haut niveau, avec l'apport des structures de recherche les plus qualifiées au sein des Universités de l'île.

Les études prévues pour ce projet pilote ont nécessité des activités particulières d'organisation et de structuration unitaire d'un grand nombre d'informations hydrologiques et morphologiques avec les informations concernant l'utilisation et les caractéristiques du territoire. Elles constituent un support utile à tout le développement du système d'information que l'Observatoire des Eaux est en train de réaliser.

Les Départements Universitaires, que l'Observatoire a pris comme centres de référence scientifique et avec lesquels il a poursuivi synergiquement les activités du projet pour obtenir les meilleurs résultats possibles, sont:

- Département de Génie Hydraulique et d'Applications sur l'Environnement (DIIAA) - Faculté de Génie, Université des Études de Palerme (Resp. Scientifique: Pr Goffredo La Loggia);
- Département de Génie Civil et de l'Environnement (DICA) - Faculté de Génie, Université des Études de Catane (Resp. Scientifique: Pr Giuseppe Rossi);
- Département des Cultures Arborées (DCA) - Faculté d'Agriculture, Université des Études de Palerme (Resp. Scientifique: Pr Federico Guglielmo Maetzke);
- Département d'Agronomie Environnementale et Territoriale (DAAT) - Faculté d'Agriculture, Université des Études de Palerme (Resp. Scientifique: Pr Carmelo Dazzi);
- Département de Génie et Technologies AgroForestières (ITAF) - Faculté d'Agriculture, Université des Études de Palerme (Resp. Scientifique: Pr Giuseppe Giordano et Pr Vito Ferro).

En ce sens, en juin et juillet 2007 des conventions ont été ratifiées avec les départements cités ci-dessus. L'objet de ces conventions est reporté ci-dessous, dans le but de définir les activités à effectuer en matière de compétence et dans les temps prévus par le projet.

- Observatoire des Eaux - DIIAA: "Recherches et études finalisées pour démontrer l'efficacité d'une approche intégrée de la définition, la caractérisation et la mitigation des processus de désertification à échelle régionale, mettant aussi au point des lignes directrices pour l'individuation des mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification".
- Observatoire des Eaux - DICA : "Recherches et études orientées sur la mise au point de lignes directrices pour l'individuation des mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification, sur la réalisation d'une intervention démonstrative de prévention et de mitigation, ainsi que sur la diffusion des connaissances technico-scientifiques relatives aux phénomènes de sécheresse et de désertification".
- Observatoire des Eaux - DCA: "Recherches et études sur le rôle de la forestation dans la mitigation des processus de désertification".
- Observatoire des Eaux - DAAT: "Recherches et études pour la réalisation d'une intervention expérimentale et démonstrative dans des zones échantillons particulièrement sensibles et finalisées au monitoring de la salinité du sol suite à l'irrigation avec des eaux à divers degrés de salinité pour la prévention et/ou mitigation des processus de dégradation/désertification du sol".
- Observatoire des Eaux - ITAF "Recherches et études sur l'état de l'art de la carte de l'érosion potentielle de la Sicile et des zones sensibles à la désertification du point de vue de la qualité du climat et du sol".

## ***Chapitre 2 - Le changement climatique***

***Ingénieur Giuseppe Geraci, Ingénieur Gianluca La Placa***

***Bureau Régional pour les Ordures et les Eaux – Secteur Observatoire des Eaux***

### **2.1 Les changements climatiques**

Les changements climatiques, récemment de plus en plus au centre de l'attention de l'opinion publique outre qu'à celle du monde technique et scientifique, peuvent jouer un rôle clé dans le processus de désertification. Si, par exemple, la *tendance* à l'augmentation de la température devait se confirmer, l'évapotranspiration (perte d'eau du sol par évaporation directe et par transpiration des plantes) aurait aussi tendance à augmenter progressivement. En outre, si une *tendance* négative des précipitations devait se vérifier, l'indice d'aridité augmenterait: il y aurait un plus grand déséquilibre entre la quantité d'eau que perdent les sols et la quantité d'eau qu'ils interceptent. Par conséquent ils favoriseraient moins la vie. Il en va de même pour la sécheresse, si, dans ces mêmes conditions, les tendances qui prévoient une augmentation plus fréquente des événements de sécheresse, se confirmaient.

Diverses études menées récemment en Italie dans le cadre de projets spécifiques confirment l'impact des changements climatiques sur l'agriculture, tendances relevées au niveau international. En particulier, tandis que dans toutes les régions de notre pays, une augmentation moyenne des températures d'environ 1°C par siècle, à partir de 1865 est confirmée, la situation concernant les précipitations est plus diversifiée sur le territoire National. La Sicile serait intéressée par une situation stationnaire ou par une *tendance* positive très légère selon les études effectuées sur une longue période (l'analyse de ce cas commence en 1750) sur deux stations de notre île. Au contraire, une récente analyse du SIAS, conduite sur de nombreuses stations mais sur une période plus courte (de 1921 à 2004) met en évidence une situation bien différente.

Mais souvent ce qui n'est pas bien cerné, ce sont les dégâts possibles, ici aussi plausibles et confirmés par les études citées ci-dessus, qui peuvent surgir car provoqués par une plus grande fréquence des événements pluviométriques extrêmes et par leur intensité. Ce qui s'est passé suite au phénomène d'inondation qui a intéressé la Sicile (dans certaines zones de la province de Syracuse, la nuit du 16 au 17 Septembre 2003, sont tombés en 7 heures environ 450 mm d'eau qui est plus de la moitié de la moyenne annuelle de cette province qui est d'environ 650 mm) a fait dire que, si de tels événements se vérifient, on ne va pas pour autant, à l'encontre de la désertification. Au contraire, il faut ici souligner de façon claire que les phénomènes intenses des précipitations sont l'une des causes les plus importantes de la désertification et il n'est pas utile de savoir que ces événements augmenteront la valeur totale des précipitations, pour l'année à laquelle ils se sont vérifiés, allant jusqu'à des niveaux théoriquement optimaux pour la vie et l'agriculture.

Enfin, il faut mettre en évidence que la salinisation des sols s'aggraverait aussi si on rencontrait, comme désormais toujours plus évident, les phénomènes de *changements climatiques à l'échelle planétaire*. L'augmentation des indices d'aridité et de sécheresse conduirait, en effet, à une consommation d'eau plus élevée pour irriguer les cultures : si les quantités d'eau disponibles avaient tendance à diminuer, vraisemblablement, dans certaines zones l'eau pourrait se concentrer progressivement en sel. Ainsi, si par exemple, on continue à prélever trop d'eau dans les nappes en proximité des côtes, on peut s'attendre à une intrusion toujours plus fréquente d'eau salée vers ces nappes, avec la conséquence de l'augmentation de leur teneur en sel. Ceci s'applique aussi pour les eaux des fleuves et des lacs de quelques régions de la Sicile.

Les projections des modèles climatiques font penser, pour la fin de ce siècle, à un réchauffement de 1,8° à 4°C, par rapport à la période 1980-1999. On attend donc, avec un certain degré de probabilité, une ultérieure augmentation de la température et des phénomènes généralement attribués aux changements climatiques, comme la variation du régime des précipitations avec une augmentation de l'intensité des pluies, l'augmentation de phénomènes tels que les crues en automne ou en hiver, la

sécheresse au printemps et en été, des vagues de chaleur et des incendies. Étant déjà une région particulièrement vulnérable, le Sud de l'Europe pourrait être victime, de façon plus accentuée, du réchauffement global et des impacts qui en découlent. Les changements, dans certains cas, encore plus soudains et graves concernent les anomalies des températures en surface de nos mers aussi bien sur les côtes qu'en profondeur. Ceux-ci pourraient amener à une altération du régime des courants et des délicats équilibres qui règlent la production des ressources biologiques et le cycle de l'eau. On prévoit notamment que de tels changements auront un fort impact sur les écosystèmes marins des côtes, sur les biens et les services qu'ils offrent. Les variations climatiques et de la température ont déjà des impacts considérables sur le système socio-économique et écologique de l'Italie. Il faut donc entreprendre de sérieuses politiques de mitigation, comme celle lancée en Mars 2007 par la Commission Européenne pour la réduction des émissions, pour l'augmentation de la contribution des sources renouvelables en 2020. Toutefois, à cause du retard du système Terre à répondre à ces réductions, l'effet des politiques de mitigation se fera sentir seulement à long terme.

Pour cette raison, il faut aussi entreprendre parallèlement une sérieuse politique d'adaptation aux changements climatiques globaux. Cette politique doit aussi prévoir une reprise et une restauration du fonctionnement des écosystèmes naturels, aussi bien des milieux aquatiques que terrestres. En particulier, les systèmes tels que les forêts et les prairies, sont en mesure de soustraire à l'atmosphère une grande quantité de gaz à effet de serre, qui représente environ 20% des émissions des gaz à effet de serre, contribuant ainsi de façon active et efficace à la mitigation du changement climatique global. Il faut penser qu'en Italie les incendies de l'été 2007 ont détruit 113.000 hectares et ont produit 4,8 millions de tonnes d'anhydride carbonique, correspondant à l'émission annuelle de la ville de Milan.



### **2.1.1 Les changements de la température à échelle globale**

Les nombreuses observations, au cours des 157 dernières années, montrent que, dans l'ensemble, les températures sur la surface terrestre ont augmenté, avec d'importantes variations régionales. En général, le réchauffement sur le dernier siècle s'est produit en 2 phases: la première de 1910 à 1940, avec une augmentation globale moyenne de 0,35°C et plus accentuée, la deuxième de 1970 à aujourd'hui, avec une augmentation de 0,55°C. On a assisté à un taux croissant du réchauffement dans les 25 dernières années et c'est au cours de ces 12 dernières années que l'on a pu constater 11 années parmi les années les plus chaudes. Les observations globales, montrent que la troposphère a subi un réchauffement légèrement supérieur par rapport à la surface, tandis que la stratosphère a subi un refroidissement graduel de 1979 à aujourd'hui ; ceci est en accord avec les attentes physiques et les résultats de nombreux modèles prévisionnels. Le phénomène de réchauffement climatique (Global Warning) provoqué par le réchauffement des océans, la fonte des glaciers et la diminution des neiges dans l'hémisphère nord est donc confirmé.

Naturellement, il n'existe pas qu'un seul thermomètre pour nous donner une mesure de la température globale, mais un réseau dense de stations dispersées sur les terres émergées et dans les océans pour permettre d'évaluer la température globale moyenne par mois.

En opposition à une tendance à l'augmentation de la température, certaines parties du globe se sont déjà refroidies depuis 1901, en particulier l'Atlantique Nord en proximité du Groenland Méridional. Toutefois pendant cette période, le réchauffement a été considérable dans les régions de l'Asie et de l'Amérique du Nord, même si, étant des zones de grande variabilité annuelle, le signal de réchauffement plus évident s'est vérifié à des latitudes plus basses, notamment dans les océans tropicaux.

Un autre aspect particulièrement intéressant, qui ressort des observations faites par les nombreuses stations présentes dans le monde, est que de 1950 à aujourd'hui, on a assisté à une diminution des jours et des nuits très froids et à une augmentation des jours et des nuits extrêmement chauds. En cohérence avec l'augmentation de la

température de la surface terrestre, on a assisté à une réduction de la longueur des fleuves et de la durée des lacs glacés; de plus, dans le monde entier, on a assisté à la réduction de la masse des glaces et de la couverture neigeuse en toutes les saisons, spécialement au printemps et en été.

De nombreuses études ont été conduites au niveau global pour établir les tendances éventuelles et les anomalies dans l'évolution des températures. Pour cela il a fallu reconstruire mais il a surtout fallu mettre à jour les *bases de données* des températures globales moyennes aussi bien de la surface terrestre que des océans. À ce sujet Jones et Moberg (2003) ont effectué un travail intéressant en revoyant et en mettant à jour le *Climatic Research Unit* (CRU) des températures moyennes par mois. Une ultérieure révision a été effectuée par Brohan et al. (2006) en réévaluant les erreurs sur une *base de données* qui part de 1950. Malgré ces améliorations, il reste encore de grandes lacunes sur ces données, surtout sur celles qui concernent les zones tropicales, au Sud et en Antarctique. Ces lacunes sont plus grandes pendant les deux guerres mondiales.

De nombreuses études ont été effectuées sur les *bases de données* des températures pour déterminer les anomalies et les *tendances*; ces études diffèrent essentiellement par les *bases de données* utilisées et par les techniques d'interpolation et de modélisation utilisées.

La Fig. 2.1 montre les anomalies annuelles de la température de la surface terrestre relatives à la période 1950-2005 et déterminées par les analyses effectuées par le CRUTEM3 (CRU/*Hadley Centre gridded land-surface air temperature version 3*), Brohan et al. (2006), par le NCDC (*National Climatic Data Center*), Smith et Reynolds (2005), par le GISS (*Goddard Institute for Space Studies*), Hansen et al. (2001), et enfin les analyses effectuées par Lugina et al. (2005).

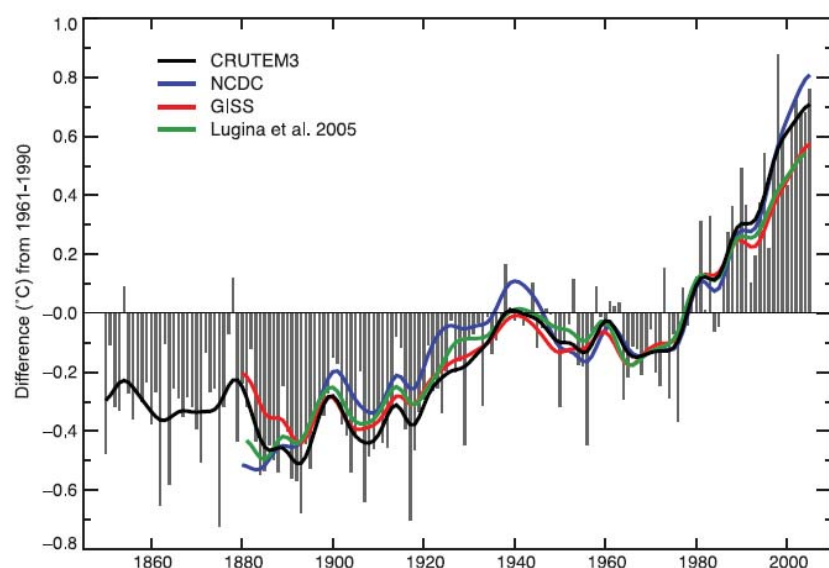


Fig. 2.1 - Anomalies annuelles de la température de la surface terrestre.

Les analyses vues auparavant diffèrent par la méthode de calcul de la moyenne globale des températures: pour CRUTEM3 c'est une moyenne pesée, en fonction de la surface des terres émergées, suivant si nous sommes dans l'hémisphère Nord (NH) ou dans l'hémisphère Sud (SH) selon l'expression  $(0,68 \cdot NH + 0,32 \cdot SH)$ ; pour NCDC c'est une moyenne pondérée de la grille box des anomalies du monde entier ; pour GISS c'est la moyenne des anomalies pour les zones de  $90^\circ \text{ N}$  à  $23,6^\circ \text{ N}$ , de  $23,6^\circ \text{ N}$  à  $23,6^\circ \text{ S}$ , de  $23,6^\circ \text{ S}$  à  $90^\circ \text{ S}$ , avec poids 0.3, 0.4, 0.3, respectivement pour chaque zone; enfin pour Lugina et al. (2005) c'est  $(NH + 0.866 \cdot SH) / 1.866$  car il exclut les latitudes au sud des  $60^\circ \text{ S}$ .

Les différences peuvent surgir aussi en raison du nombre de stations prises en considération par les méthodes; CRUTEM3, NCDC et GISS se basent sur respectivement 4394, 7230 et sur un nombre supérieur à 7200 stations, même si de nombreuses données des stations de base sont communes.

De 1950 à 2004, la *tendance* annuelle des températures moyennes minimum et maximum de la surface terrestre a montré une augmentation de  $0,20^\circ \text{C}$  pour les minimum et de  $0,14^\circ \text{C}$  pour les maximum, par décade, avec une *tendance* des

amplitudes diurnes de température (DTR - *Diurnal Temperature Range*) de  $-0,07^{\circ}\text{C}$ , par décade, (*Vose et al.*, 2005; Fig. 2.2), donnée par la différence de température entre le minimum enregistré pendant la nuit et le maximum pendant le jour.

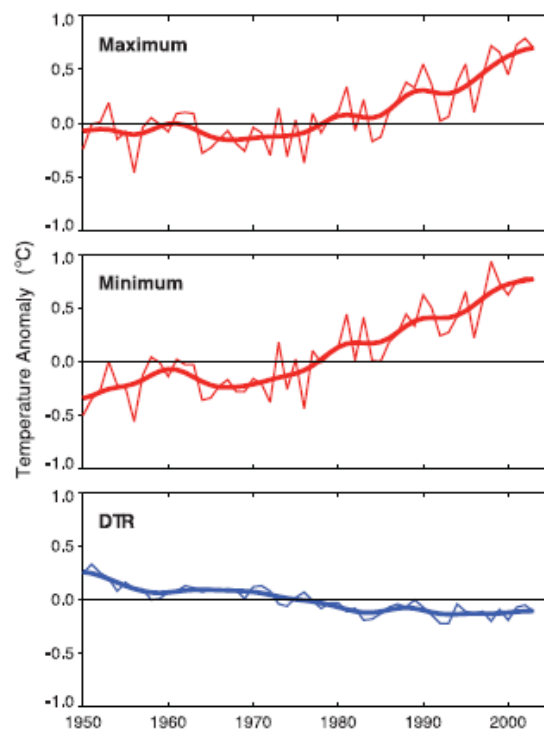


Fig. 2.2 - Evolution des températures minimales, maximales et amplitudes diurnes de la température (DTR) pendant la période 1950-2004.

Ces résultats sont en accord avec le Troisième Rapport d'Évaluation (TAR - *Third Assessment Report*) qui allait de 1950 à 1993 et qui comprenait les analyses effectuées avec une couverture spatiale de 54% par rapport au 71% des analyses effectuées dans le dernier *Rapport*.

Quand on parle de réchauffement de la surface terrestre, il faut prêter une attention particulière aux mécanismes de transfert et d'accumulation de la chaleur qui se produisent en général à l'intérieur des villes et des zones urbanisées, qui deviennent par la suite l'habitat quotidien de la majeure partie de la population. La modification de l'utilisation du sol dans les villes a des effets considérables sur le transfert de la

chaleur et sur la répartition en chaleur sensible et en chaleur latente ; l'augmentation relative à l'intérieur des villes par rapport aux zones rurales environnantes, connue comme île de chaleur urbaine (UHI - *Urban Heat Island*), naît de ces changements et peut être aussi influencée par les valeurs des précipitations, de la pollution et de l'aérosol. Cependant, l'instauration de cette dite île de chaleur urbaine dépend aussi de facteurs tels que le climat local, la nébulosité, le vent qui, à leur tour, dépendent des saisons. De nombreuses études locales ont démontré que le microclimat à l'intérieur des villes est en moyenne plus chaud que celui des zones non urbanisées environnantes.

Toutefois, des études menées à grande échelle ont mis en évidence que la tendance à l'augmentation de la température à l'intérieur des villes, par décade, est d'un ordre de grandeur inférieur par rapport aux tendances qui sont enregistrées dans les zones non urbanisées (*Jones et al.* 1990; *Peterson et al.*, 1999). La corrélation entre île de chaleur urbaine (UHI) et développement économique pourrait être aussi une cause de réchauffement des villes ; toutefois on a vu que les localités de majeur développement économique sont aussi celles où le réchauffement de l'atmosphère est la principale cause de la *tendance* positive des températures. Par conséquent la corrélation entre réchauffement et développement socio-économique n'est plus statistiquement significative.

De nombreuses études ont été effectuées pour déterminer la *tendance* des températures à échelle globale; chacune d'elles diffère par les *bases de données* prises en considération et par les méthodes d'interpolation utilisées. Le tableau 2.1 montre les principales différences des méthodes vues auparavant.

Dataset	Temperature Trend (°C per decade)		
	1850–2005	1901–2005	1979–2005
<b>Northern Hemisphere</b>			
CRU/UKMO (Brohan et al., 2006)	$0.047 \pm 0.013$ $R^2=54$	$0.075 \pm 0.023$ $R^2=63$	$0.234 \pm 0.070$ $R^2=69$
NCDC (Smith and Reynolds, 2005)		$0.063 \pm 0.022$ $R^2=55$	$0.245 \pm 0.062$ $R^2=72$
<b>Southern Hemisphere</b>			
CRU/UKMO (Brohan et al., 2006)	$0.038 \pm 0.014$ $R^2=51$	$0.068 \pm 0.017$ $R^2=74$	$0.092 \pm 0.038$ $R^2=48$
NCDC (Smith and Reynolds, 2005)		$0.066 \pm 0.009$ $R^2=82$	$0.096 \pm 0.038$ $R^2=58$
<b>Globe</b>			
CRU/UKMO (Brohan et al., 2006)	$0.042 \pm 0.012$ $R^2=57$	$0.071 \pm 0.017$ $R^2=74$	$0.163 \pm 0.046$ $R^2=67$
NCDC (Smith and Reynolds, 2005)		$0.064 \pm 0.016$ $R^2=71$	$0.174 \pm 0.051$ $R^2=72$
GISS (Hansen et al., 2001)		$0.060 \pm 0.014$ $R^2=70$	$0.170 \pm 0.047$ $R^2=67$

Tab. 2.1 - Différences entre les diverses études sur les *tendances* thermométriques.

Toutes les séries montrent que l'année la plus chaude s'est vérifiée après 1997, même s'il y a eu un léger désaccord quand il a fallu établir quelle a été l'année la plus chaude. La *base de données* HadCRUT3 indique l'année 1998 comme l'année la plus chaude contrairement à NCDC et GISS qui indiquent l'année 2005.

La Fig. 2.3 illustre les *modèles (pattern)* spatiaux des changements de la température de la surface terrestre de 1901 à 2005 et de 1979 à 2005, tandis que la Fig. 2.4 montre les *tendances* saisonnières de 1979 à 2005.



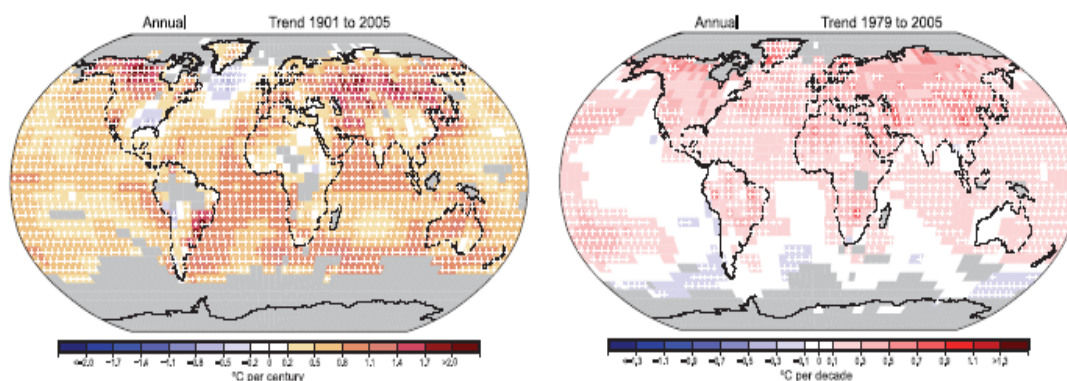


Fig. 2.3 - *Modèles spatiaux des changements des températures de la surface terrestre.*

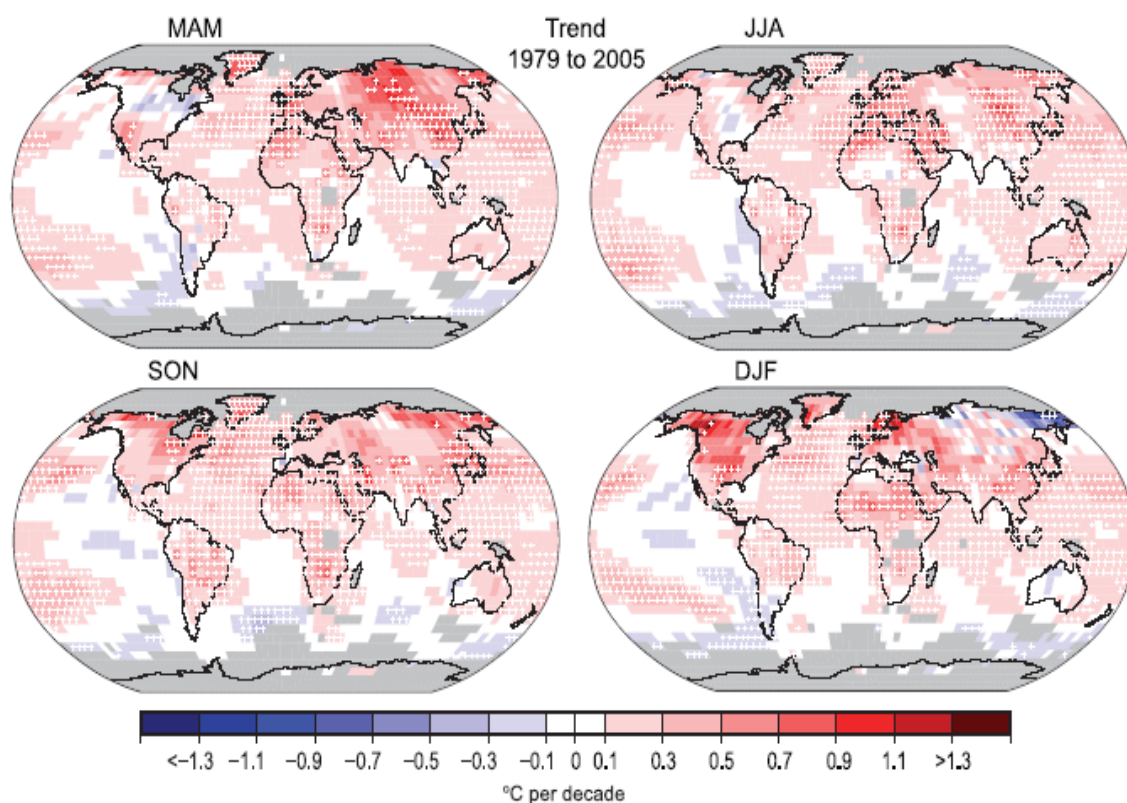


Fig. 2.4 - *Tendances saisonnières des températures.*

De ces cartes, on déduit que le réchauffement est statistiquement significatif sur la majeure partie de la surface du globe, à l'exception d'une zone au sud du Groenland, de trois régions plus petites au Sud-est des États-Unis et des zones de la Bolivie et du

bassin du Congo. Le réchauffement est plus fort dans les zones intérieures du continent asiatique et dans les zones nord-occidentales de l'Amérique du Nord et dans quelques zones du sud-est tel que le Brésil. Au niveau saisonnier, le réchauffement a été plus fort dans la partie occidentale de l'Amérique du Nord, de l'Europe du Nord et de la Chine en hiver, en Europe du Nord et en Asie Orientale au printemps, en Europe et en Afrique du Nord en été et enfin en Amérique du Nord et en Asie Orientale en automne.

### **2.1.2 Changements des précipitations à l'échelle globale**

Parallèlement à la *tendance* qui voit l'augmentation des températures globales moyennes d'année en année, on peut observer les valeurs des précipitations qui présentent une grande variabilité aussi bien spatiale que temporelle.

Des observations indiquent la présence de changements en quantité, intensité, fréquence et en genre des précipitations. Les aspects de ces précipitations, en général, présentent une grande variabilité naturelle; El Niño et les changements dans la circulation atmosphérique de l'Atlantique Nord ont une forte influence sur celui-ci. El Niño, en effet, est un phénomène global impliquant l'océan et l'atmosphère. La partie du phénomène concernant l'océan est appelée El Niño, qui n'est autre qu'une importante variation périodique de la température de l'océan Pacifique Oriental ; les oscillations des températures moyennes des courants comportent de lourdes conséquences sur le climat de toute la planète et en particulier sur ceux de la zone centre-occidentale de l'Amérique, des zones plus à est du continent asiatique et de l'Australie. La partie du phénomène qui concerne l'atmosphère est appelée oscillation méridionale; elle reflète les fluctuations mensuelles ou saisonnières de la différence de pression atmosphérique entre Tahiti et Darwin (Australie).

Les tendances enregistrées de 1900 à 2005 montrent une diminution des précipitations en Amérique du Nord et du Sud, en Europe du Nord, en Asie Septentrionale et Centrale, en Afrique du Sud et dans le Bassin Méditerranéen. On enregistre de nombreux changements dans le genre des précipitations qui, dans de

nombreuses régions septentrionales, se sont transformées de neige en pluie ; en outre, on constate de plus en plus des phénomènes extrêmes tels que les précipitations intenses mais brèves. Ces changements sont associés à une augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère dérivant du réchauffement globale des océans, surtout aux basses latitudes.

L'évolution générale des précipitations est représentée en Fig. 2.5 où la *tendance* des précipitations est exprimée par l'indice d'anomalie d'humidité de Palmer (PDSI - *Palmer Drought Severity Index*). Palmer (1965), qui se base sur le concept de l'offre et la demande dans l'équation de la balance hydrique, a développé cet indice pour avoir une mesure non seulement du manque de précipitations dans une certaine région, mais aussi des conditions d'humidité de cette région. Pour être calculé, l'indice a besoin des valeurs des précipitations et des températures, de la capacité hydrique du sol et des autres variables météorologiques. Cet indice, bien qu'il ait de vastes applications, a aussi quelques limitations. Parmi celles-ci nous signalons la sensibilité par rapport à la capacité hydrique du sol et la difficulté de confronter les résultats obtenus par région, ayant un bilan hydrologique très différent (en effet, pour son calcul l'indice a besoin de quelques constantes que Palmer a évaluées à l'aide de l'analyse de données météorologiques relatives à neuf divisions des Etats-Unis). L'indice varie entre - 6 et + 6; la classification qui y est associée est illustrée dans le tableau 2.2.

VALORI PDSI	CLASSE
> 4	Estremamente umido
da 3 a 4	Molto umido
da 2 a 3	Moderatamente umido
da 1 a 2	Lievemente umido
da 0.5 a 1	Incipiente periodo umido
da 0.5 a -0.5	Quasi normale
da -0.5 a -1	Incipiente periodo secco

da -1 a -2	Lievemente siccitoso
da -2 a -3	Siccità moderata
da -3 a -4	Siccità severa
< -4	Siccità estrema

Tab. 2.2 - Classification de l'indice PDSI.

Cet indice, en effet, donne des indications sur le degré d'humidité d'une certaine région en se basant sur les valeurs de température et d'humidité enregistrées dans l'atmosphère ; les valeurs positives indiquent un climat humide tandis que les valeurs négatives un climat sujet à la sécheresse. En analysant la Fig. 2.5 (ci-dessus) nous pouvons voir comment cet indice restitue les valeurs positives dans certaines zones du Sud et de l'Amérique du Nord. Ceci est lié aussi au fait que, dans ces zones, l'augmentation de la température a été moins forte qu'ailleurs. Les principales zones qui ont un indice négatif sont les zones situées en Afrique Centre-Occidentale et Méridionale, où se trouvent les principaux déserts du monde ainsi que l'Europe du Sud dans le Bassin Méditerranéen. La Fig. 2.5 (ci-dessous) montre la variation du signe et de l'intensité de cet indice. À partir de 1900 on note, en effet, une tendance générale à une diminution de l'indice pendant la première moitié du siècle et ensuite une inversion de la tendance vers une soudaine augmentation ces 20 dernières années.

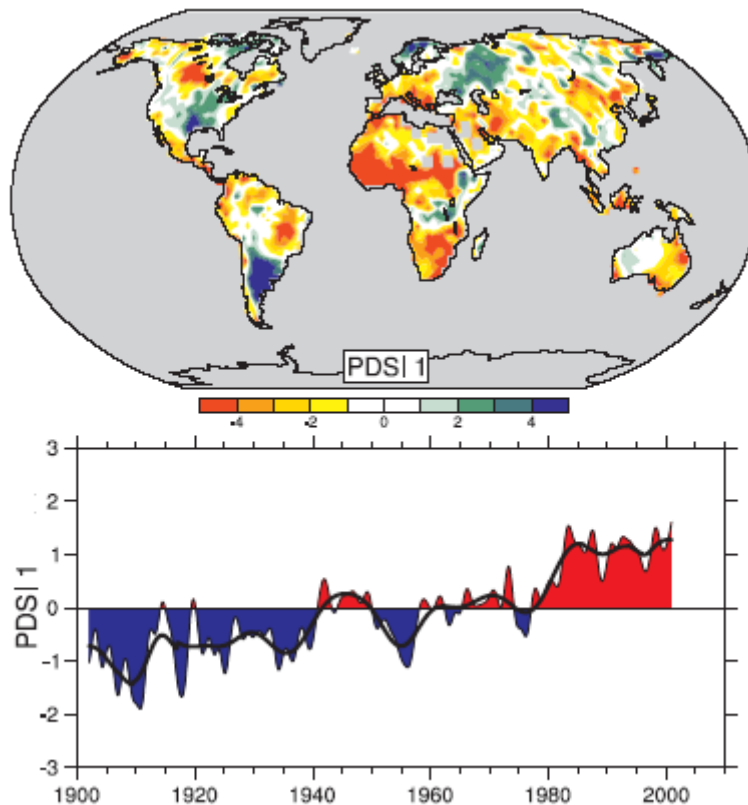


Fig. 2.5 - Représentation de l'indice d'anomalie d'humidité de Palmer (PDSI) de 1900 à 2002 (en haut) et variations de l'indice de 1900 à 2000 (en bas).

En général donc, les changements climatiques influencent et altèrent le régime des précipitations; le réchauffement accélère les processus du dessèchement et augmente l'incidence potentielle et la gravité de la sécheresse observée dans de nombreux pays du monde. La relation de Clausius Claperyon démontre que la capacité de l'atmosphère d'emmagasiner la vapeur d'eau augmente d'environ de 7% par °C d'augmentation de la température. Ce phénomène a augmenté l'intensité des précipitations, le risque de phénomènes extrêmes et la vérification des phénomènes à caractère neigeux. Le climat plus chaud, par conséquent, joue un double rôle; il augmente le risque de sécheresse où il n'a pas plu et le risque d'inondations où il a plu à cause des cas de pluies extrêmes, en temps et/ou lieux différents. Par exemple l'été 2002 en Europe a été touché par des phénomènes de pluies intenses mais de courte

durée provoquant de nombreuses inondations, mais un an plus tard, on a assisté au record de vagues de chaleur et de sécheresse.

Les variations dans le type de précipitations ont été observées dans de nombreux endroits, spécialement dans les zones de moyenne et haute altitude où l'augmentation des pluies et la diminution des précipitations neigeuses ont entraîné un abaissement des ressources hydriques en été, alors qu'elles sont encore plus nécessaires.

Quand on parle de phénomènes à forte variabilité spatiale, l'une des principales difficultés est toujours la mesure de l'ampleur de la pluie. Une zone de préoccupation est, en effet, celle qui concerne la quantification et la mesure des précipitations. Les principaux problèmes naissent essentiellement pour les mesures in situ, tandis que pour les mesures télédetectées (radar et bases spatiales) les principales incertitudes naissent dans l'utilisation des algorithmes de conversion des mesures radiométriques en taux de précipitation superficielle.

Les *tendances* globales des précipitations ont été analysées en utilisant les données du réseau GHCN, prenant pour base de données les calculs les anomalies de la période 1981-2000 (Vose *et al.*, 1992; Peterson *e Vose*, 1997). Toutefois il existe de nombreuses autres *bases de données* qui couvrent des périodes plus récentes; dans le tableau 2.3, les principales caractéristiques de ces *bases de données* y sont décrites, tandis que leurs tendances significatives sont représentées dans le tableau 2.4.



Series	Period of Record	Gauge only	Satellite and gauge	Spatial infilling	Reference
GHCN	1900–2005	X		No	Vose et al., 1992
PREC/L	1948–2002	X		Yes	Chen et al., 2002
GPCP	1979–2002		X	Yes	Adler et al., 2003
GPCC VASCLimO	1951–2000	X		Yes	Beck et al., 2005
GPCC v.3	1951–2002	X		Yes	Rudolf et al., 1994
CRU	1901–2002	X		Yes	Mitchell and Jones, 2005

Tab. 2.3 - Caractéristiques des six *bases de données* utilisées pour le calcul des *tendances* sur les précipitations.

Series	Precipitation Trend (mm per decade)		
	1901–2005	1951–2005	1979–2005
PREC/L		$-5.10 \pm 3.25^a$	$-6.38 \pm 8.78^a$
CRU	$1.10 \pm 1.50^a$	$-3.87 \pm 3.89^a$	$-0.90 \pm 16.24^a$
GHCN	$1.08 \pm 1.87$	$-4.56 \pm 4.34$	$4.16 \pm 12.44$
GPCC VASCLimO		$1.82 \pm 5.32^b$	$12.82 \pm 21.45^b$
GPCC v.3		$-6.63 \pm 5.18^a$	$-14.64 \pm 11.67^a$
GPCP			$-15.60 \pm 19.84^a$

Tab. 2.4 - *Tendances* globales des précipitations avec un niveau de significativité égal à 95%. Toutes les *tendances* sont évaluées sur moyennes annuelles.

Naturellement, entre les différentes méthodes que nous avons vues, il existe un certain nombre de différences dans les modalités de traiter les données, dans les sources des données et dans la période prise en considération qui conduisent à une différence naturelle des évaluations de la tendance. L'évaluation des précipitations faite par le réseau GHCN dérive d'une interpolation des données obtenues en utilisant les satellites. La reconstruction des précipitations dans les océans (PREC/L *Che net al.*, 2002) inclut les données du réseau GHCN, les données de la *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), les données du *Climate Prediction Center's* obtenus à l'aide du *Climate Anomaly Monitoring System* (CAMS), et les données du *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP; *Adler et al.*, 2003). La *base de données* dénommée GPCC VASCLimO (*Beck et al.*, 2005) utilise seulement les données prises à long terme par des stations semi-continues et dont l'homogénéité

peut être assurée, tandis que celle dénommée GPCCv.3 a utilisé toutes les stations disponibles de façon à fournir une couverture plus complète du territoire. La série de l'évolution globale des anomalies sur les précipitations est reportée à la Fig. 2.6.

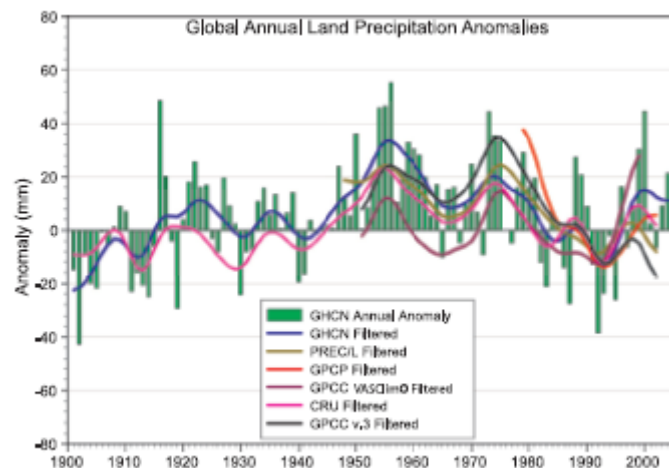


Fig. 2.6 - Anomalies des précipitations.

Pour la période 1979-2005, les tendances vont de -16 à +13 mm par décennie, mais aucune n'est significative. On note toutefois que les différences essentielles rencontrées dans les différentes méthodes mettent en évidence la difficulté du monitoring d'une variable comme la précipitation qui présente une grande variabilité aussi bien spatiale que temporelle; cette variabilité existe aussi pour la température même si elle figure en quantité moins élevée.

Les modèles spatiaux des tendances des précipitations annuelles pendant les périodes 1901-2005 et 1979-2005 sont représentés en Fig. 2.7. Les tendances observées ont été calculées sur la base des données de la station GHCN interpolées sur une grille de 5° x 5° de latitude/longitude; les zones en gris ont des données suffisantes pour produire des *tendances* fiables tandis que les croix indiquent les zones qui présentent une *tendance* significative à 95%.

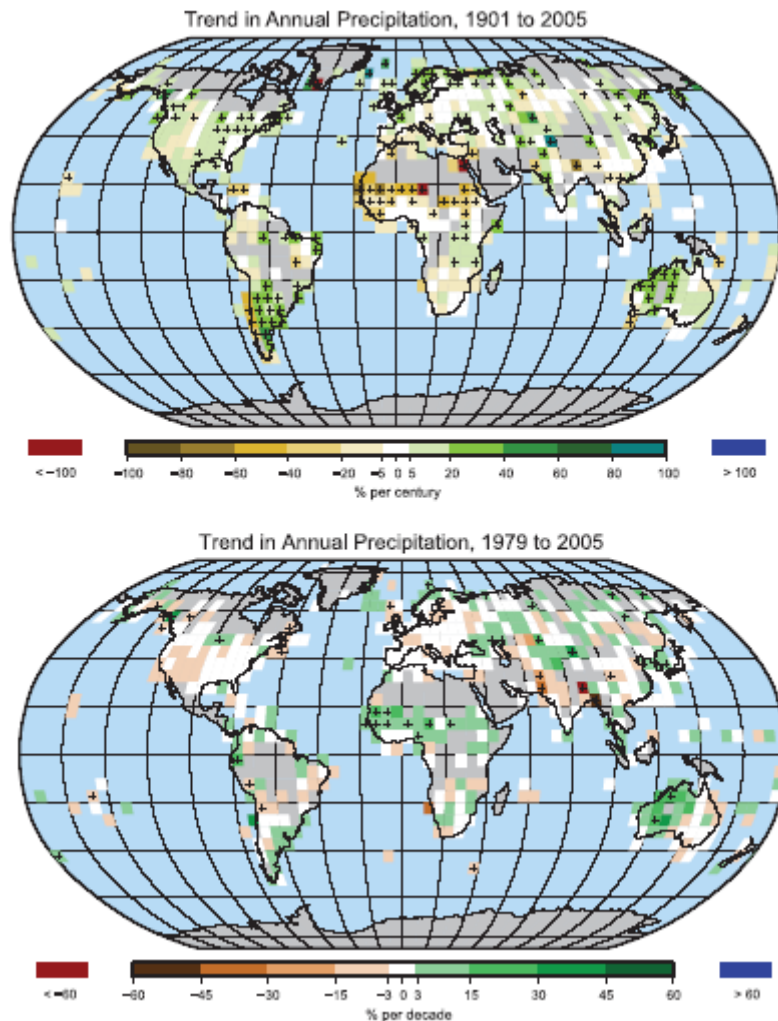


Fig. 2.7 - *Tendance* des précipitations annuelles sur la surface terrestre déterminée par la base de données du réseau GHCN.

Dans la majeure partie de l'Amérique du Nord, en particulier aux hautes altitudes et dans les régions du Canada, la précipitation annuelle a augmenté pendant les 105 années prises en considération. La première exception se trouve dans le Sud-ouest des États-Unis, dans le Nord-Ouest du Mexique et dans la péninsule de Baja Californie, où la tendance des précipitations annuelles a été négative (1-2% par décennie) et la sécheresse a prédominé ces dernières années. On a observé des tendances négatives aussi dans les parties de la côte occidentale du Chili et en Afrique, au Sahel où les plus grandes tendances négatives ont été enregistrées. Pour quelques zones dans le

monde, il n'a pas été possible de reconstruire une tendance des précipitations (Groenland, Sahara, Antarctique et Plateau Tibétain); pour ces régions, en effet, les données n'ont pas été considérées suffisamment fiables. En Figure 2.8, la *tendance* annuelle des précipitations de la période qui va de 1901 à 2005 est illustrée; en outre, l'évaluation moyenne et les anomalies des précipitations de 19 régions sont illustrées.

### ***Chapitre 3 - Le phénomène de la désertification***

***Ingénieur Giuseppe Geraci, Ingénieur Gianluca La Placa***

***Bureau Régional pour les Ordures et les Eaux – Secteur Observatoire des Eaux***

Parmi les phénomènes les plus préoccupants qui intéressent de nombreuses régions du globe terrestre, il existe celui de la désertification. De cette considération naît un intérêt, de la part de la communauté scientifique, de connaître et d’approfondir les problématiques qui sont liées à ce phénomène et à l’identification des zones qui sont les plus exposées à ce risque.

Quand on parle de phénomène de désertification il faut, avant tout, souligner que ce terme n’a pas de définition univoque; au fil des années, différentes interprétations lui ont été attribuées et les plus importantes sont:

- “La création de conditions semblables au désert résultant de processus d’érosion” (Aubréville, 1949);
- “La réduction ou la destruction du potentiel biologique de la terre qui peut conduire à des conditions désertiques. Il s’agit d’un aspect de dégradation de l’écosystème dû à une réduction consistante de leur potentiel biologique [...]” (Programme de l’Environnement des Nations Unies, UNEP, 1977);
- “Le processus qui conduit à une réduction irréversible de la capacité du sol à produire des ressources et des services” (Organisation pour l’Alimentation et l’Agriculture - FAO, Organisation des Nations Unies pour l’Éducation, la Science et la Culture - UNESCO, UNEP, 1979);
- “L’appauvrissement des écosystèmes terrestres dû à l’impact humain, qui peut être mesuré par la diminution de productivité d’espèces utiles, la réduction de la biomasse et de la diversité de la faune et de la flore, aux niveaux tant microscopique que macroscopique, une détérioration accélérée des sols” (Dregne, 1986) ;
- “Toutes les expressions comprises pour indiquer les processus socio-économiques naturels et anthropiques qui entraînent une modification du sol,

de la végétation, de l'atmosphère et du bilan hydrique des régions caractérisées par l'aridité provoquée par des facteurs édaphiques et climatiques" (FAO/UNEP, 1984);

- “Dégradation du sol et des ressources hydriques dans des zones arides, semi-arides et subhumides sèches, due principalement aux impacts anthropiques négatifs” (UNEP, 1991).

Aujourd'hui la définition officielle de désertification est celle élaborée pendant la conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (Rio, 1992) par l'utilisation du terme "dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines". Cette définition, acceptée dans le cadre de la Convention Internationale des Nations Unies pour la lutte contre la sécheresse et la désertification (UNCCD), est considérée profondément innovatrice par rapport aux définitions précédentes car la dégradation du sol est vue aussi bien en termes de dégradation physique et chimique que de perte de rendement économique dérivant de sa culture; elle met par ailleurs en évidence comment la désertification peut être déterminée par la superposition de causes d'origine naturelle et anthropique.

### **3.1 Zones de la terre concernées par la désertification**

Les zones potentiellement les plus exposées à la désertification sont les zones arides et semi-arides qui représentent plus de 30% de la surface terrestre, surtout celles en proximité des zones désertiques de la planète.

Les déserts proprement dits représentent environ 7% des terres émergées. Parmi les déserts plus importants et étendus, on rappellera le désert de Sonora qui s'étend du Mexique Nord Occidental à la zone Sud Occidentale des États-Unis et du Désert d'Atacama dans l'Amérique du Sud entre les Andes et le Pacifique. En Afrique les plus grands déserts sont ceux du Kalahari en Afrique du Sud et en Afrique du Nord le désert du Sahara qui est le plus vaste du monde. En Asie on retiendra le désert de la



Péninsule Arabique, les zones désertiques de l'ex Union Soviétique, le désert de l'Iran, le grand désert Indien de Thar (Rajasthan), le désert de Gobi en Mongolie et du Takla-Makan en Chine. Enfin, en Australie, on citera le Grand Désert de Sable et le grand Désert Victoria. Autour de ces déserts s'étendent des zones semi-désertiques qui peuvent aller à l'encontre de la désertification en fonction des changements climatiques ou à cause de l'exploitation non durable de l'homme.

Toutefois, au cours des dernières décennies, les régions à climat tempéré, tel que l'Europe, en particulier, et les pays du Bassin Méditerranéen, ont été aussi intéressées par des phénomènes de désertification causés par une utilisation non durable du sol et de la concomitance entre augmentation des températures et la réduction des précipitations.

Les données qui se réfèrent à la désertification, à son évolution et à ses nombreuses répercussions sur l'environnement, économiques et sociales sont en partie conditionnées par la complexité inhérente au grand nombre de variables naturelles, anthropiques, politiques et sociales qui agissent entre elles. Dans chaque cas, quelques chiffres peuvent aider à comprendre l'extension du phénomène qui intéresse, même si en mesure différente, 110 nations de tous les continents.

Selon le "Rapport 1998 sur le Développement Humain" des Nations Unies, depuis 1945, environ 2 milliards d'hectares ont été dégradés, c'est-à-dire plus d'un sixième des terrains productifs du monde, réduisant la capacité de la terre à supporter les activités humaines. Dans près de deux tiers de ces zones, égales à la Chine et à l'Inde, la productivité agricole s'est considérablement réduite ou a été annulée et les pays en voie de développement, en particulier l'Afrique et l'Asie, ont supporté plus de 80% de ce dommage : presque la moitié des terrains dégradés du monde se trouve en Asie et environ 500 millions d'hectares sont modestement ou sérieusement compromis en Afrique - deux continents qui dans l'ensemble constituent les 2/3 de la pauvreté du monde. La culture excessive, le pâturage intense et la réduction des forêts contribuent chacun à 30% de ces dégâts et l'exploitation excessive du bois à usage de combustible y contribue à 7%.

En ce qui concerne les surfaces, au niveau mondial, à cause des processus de dessèchement et de désertification, tous les ans 12 millions d'hectares de terrains agricoles deviennent inutilisables et l'on estime que la perte de terre cultivable s'élève à près de 24 milliards de tonnes/an, à une vitesse supérieure de 30-35 fois à la vitesse naturelle. Selon l'UNEP, Programme de l'Environnement des Nations Unies (1997), 69% des 5,2 milliards d'hectares de terres émergées sont dans une situation de dégradation ou sont sujettes à désertification et 70% des terrains arides utilisés en agriculture sont en train de se dégrader. Selon l'*Office for land management* (USA), 40% du territoire des États-Unis est vulnérable aux phénomènes de la désertification et actuellement environ 2/5 des terrains pour pâturage du Texas sont déjà dans un état d'aridité au point d'être inutilisables.

La situation la plus préoccupante est certainement celle de l'Afrique où 494 millions d'hectares sont dégradés (*Matthews et Hammond*, 1999) et de récentes études estiment que sur le continent 65 millions d'hectares de terres fertiles se sont déjà transformées en désert. Dans la seule région du Sahel, le désert a avancé vers le sud de plus de 10 km entre 1950 et 1975. De vastes zones sont aussi concernées en Australie où le Grand Désert Victoria et le Grand Désert de Sable s'étendent et l'on note, de plus, de nombreuses zones agricoles sujettes à une perte progressive de fertilité.

En Amérique latine, parmi les pays où la désertification se développe, on citera le Pérou, où environ 16% du territoire National va à l'encontre de processus de désertification et 28 millions d'hectares dans la région des Andes sont particulièrement exposés à l'érosion; l'Argentine, où le territoire atteint est d'environ 46,4 millions d'hectares ; le Chili, avec 38 millions d'hectares de zones désertiques et quelques vastes zones du Brésil.

Un autre continent particulièrement touché est le continent asiatique, où l'on estime 747 millions d'hectares de terrains déjà dégradés (*Matthews e Hammond*, 1999) et où, pour les prochaines années, on estime une ultérieure perte potentielle d'environ 275 millions d'hectares de terres fertiles.

En Europe, selon les données publiées en 1998 dans le rapport du Programme des Nations Unies pour le Développement (UNDP), on estime que les zones de sol dégradé sont égales à environ 219 millions d'hectares et que 25% des terres intéressées par l'agriculture et 35% des pâturages sont dans une condition à risque. On souligne que la première tentative d'application d'une méthodologie commune au niveau du Bassin Méditerranéen, a été effectuée par le Projet DISMED - *Désertification Information System for the Mediterranean*, coordonné par l'UNCCD, en collaboration avec l'Agence Européenne de l'Environnement et la Fondation de Météorologie Appliquée.

Cette étude a mené à l'individuation des zones à risque de désertification dans les pays qui donnent sur la Méditerranée et a été basée sur un indice de sensibilité à la désertification, à son tour fonction d'un indice de qualité de la végétation, d'un indice de qualité du climat et d'un indice de qualité du sol. De ces résultats il est apparu ensuite que l'Espagne est le pays à plus grand risque en Europe, tel qu'en témoigne la Fig. 3.1, tandis que parmi les régions italiennes, la Sicile est la plus exposée (Fig. 3.2).

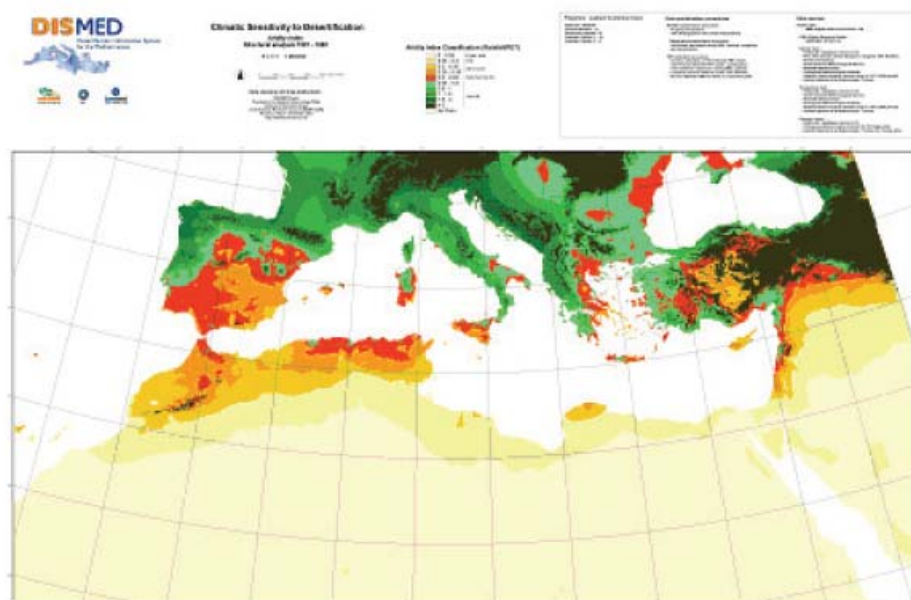


Fig. 3.1 - Zones sensibles à la désertification dans le Bassin Méditerranéen, Projet DISMED 2003, échelle 1:5.000.000.

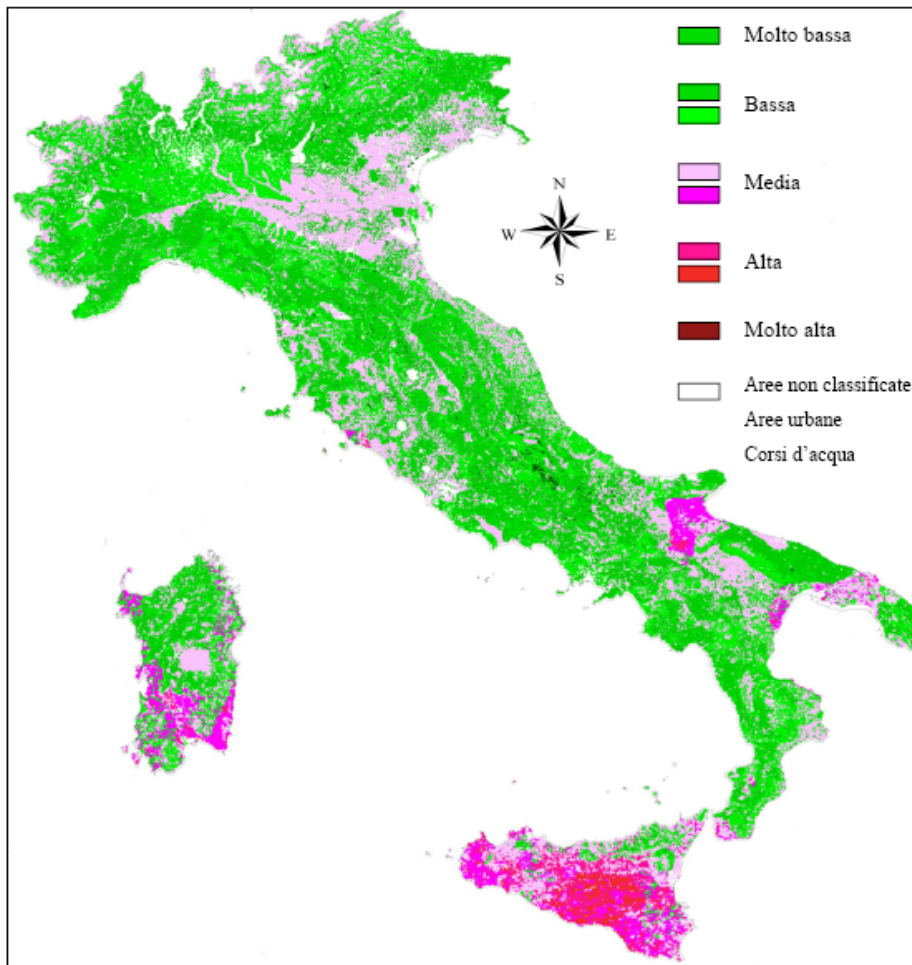


Fig. 3.2 - Classification du territoire italien selon le risque de désertification, Projet DISMED 2003.

À cause du phénomène de la désertification, le Programme de l'Environnement des Nations Unies (UNEP), déjà en 1978, quantifiait au niveau global une perte de revenu égale à environ 42 milliards de \$ Dollars/ans, dont 21 milliards en Asie, 9 en Afrique, 5 en Amérique du Nord, 3 respectivement en Amérique du Sud et en Australie et 1 en Europe, le continent le moins touché mais aussi le plus petit.

## **3.2 Les causes de la désertification**

La désertification est un problème complexe et ses causes doivent être recherchées dans l'interaction entre facteurs prédisposants, causes d'origine naturelle et causes anthropiques, si bien que souvent il est difficile de comprendre jusqu'à quel point une cause doit être attribuée à la nature ou à l'action de l'homme.

### **3.2.1 Facteurs prédisposants**

Les facteurs prédisposants qui peuvent favoriser les formes de dégradation sont multiples; parmi ceux-ci on peut prendre en considération la fragilité intrinsèque de nombreux écosystèmes déjà souvent altérés par l'urbanisation et la pollution et donc capables de s'opposer avec efficacité et rapidité aux transformations extérieures. L'aspect pédologique et morphologique joue aussi un rôle fondamental ; en effet, les zones à très forte pente sont plus sujettes aux phénomènes d'érosion avec, comme conséquence, un manque de structure du terrain, une faible teneur de substances organiques et une faible perméabilité. En outre, les versants qui sont exposés au Sud, dans l'hémisphère Boréal et au Nord, dans l'hémisphère Austral, reçoivent un flux de radiation solaire plus élevé par rapport aux autres ; ceci détermine des conditions microclimatiques défavorables à la régénération de la végétation naturelle, une fois enlevée par l'action directe ou indirecte de l'homme. La pente et l'exposition contribuent donc à déterminer la vulnérabilité du territoire aux phénomènes d'érosion par altération météorique. À la dégradation du sol est associée aussi la dégradation de la couverture végétale, surtout si elle n'est pas habituée à résister à de longues périodes de sécheresse ; une dégradation du sol et de la végétation se répercute aussi sur la faune en perturbant ainsi l'écosystème tout entier.

### **3.2.2 Causes naturelles**

Les causes naturelles de la désertification doivent être recherchées essentiellement dans la rareté des précipitations si associées à des valeurs élevées des températures. Dans ce contexte se situent les problèmes d'aridité et de sécheresse climatique d'une

région, définis précédemment. L'intensité des précipitations peut être considérée une autre cause du phénomène; en effet quand les précipitations brèves mais intenses frappent les terrains privés de couverture végétale, le ruissellement enlève du terrain la couche en surface, la plus riche en matière organique et crée avec le temps une forme d'érosion extrême telle que les calanques. Les zones arides, semi-arides et subhumides sèches sont souvent exposées au risque de pluies brèves mais intenses qui, au lieu d'atténuer les effets de la rareté des précipitations, provoquent des phénomènes d'érosion et accentuent donc la désertification.

Dans les zones arides et semi-arides une autre cause naturelle de la désertification est constituée par l'action érosive du vent ; l'érosion du vent s'effectue par dissipation de l'énergie du vent sur le sol ou sur les matériaux de couverture, tels que la végétation. Celle-ci peut être réduite en diminuant la vitesse du vent rasant le sol au moyen d'écrans réalisés par des structures élastiques et en particulier avec des matériaux végétaux vifs ou mort. La vitesse du vent se réduit rapidement avec l'altitude, mais, en contact avec le sol, elle crée une couche de forte turbulence. Cette couche dépend de la rugosité du sol pour la granulométrie ou de la hauteur et de la densité du manteau végétal. Les turbulences commencent à se former quand la vitesse du vent dépasse les 2-3 km/h, mais seulement à une vitesse de 10-15 km/h le vent réussit à soulever des particules de terre. Dans les zones arides les lithosols privés de matière organique dominant : par conséquent les particules désintégrées sont souvent sujettes à transport éolien en fonction du rapport entre la dimension et le poids.

En présence d'arbres de grandes dimensions, une grande partie de l'énergie du vent est absorbée par le feuillage remué par le vent, par conséquent, en aval des arbres s'instaure une zone réparée moins venteuse où se réduit l'érosion du sol. Si le vent, toutefois, heurte un obstacle rigide comme un bloc rocheux, il le contourne en exerçant avec le sable un effet d'abrasion qui, avec le temps, finit par éroder le bloc. L'action d'érosion du vent est donc caractérisée par des phases et des formes diverses qui présentent une propre nomenclature: avec le terme déflation, en particulier, on indique un processus de transport éolien, avec le terme corrosion, l'action d'abrasion des surfaces résistantes par effet du transport de sable en suspension, tandis qu'avec

l'accumulation, la stabilisation du matériel déposé dans une zone plus ou moins lointaine de sa zone d'origine. Souvent dans ces climats, l'action d'effritement des roches et des terrains est causée non seulement par l'action érosive du vent mais aussi par les fortes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit qui provoquent des dilatations et des contractions qui détruisent la roche progressivement.

### **3.2.3 Causes anthropiques**

Les causes anthropiques de la désertification sont multiples, parmi lesquelles la transformation des écosystèmes forestiers en écosystèmes agricoles joue un rôle important ; elle a prédisposé au risque de dégradation de vastes portions de la surface terrestre. Le déboisement provoque en effet une forte réduction de la capacité de la rétention hydrique du sol; en outre on vérifie le retrait de l'état organique en surface, à cause des pluies, à savoir la couche en majeure partie responsable de la régulation des écoulements hydriques et de l'activité biologique du sol. Le débroussaillage est aussi une pratique nuisible car elle dénude le sol, accentuant l'érosion; il altère le microclimat et porte atteinte à la faune existante. Les actions de déforestation sont causées principalement par l'antagonisme existant entre les diverses utilisations du territoire et constituent donc le résultat d'un contraste entre les forces environnementales, sociales, politiques et culturelles présentes sur un territoire donné. Le caractère souvent non durable de ces activités est lié à la nécessité de satisfaire les diverses exigences économiques ; on estime notamment que le secteur agricole au cours des prochaines 25 années aura besoin de 250 à 300 millions d'hectares de nouvelles terres pour satisfaire la demandes des exploitations, des cultures de subsistance et des zones pastorales, aux dépens des forêts tropicales. La déforestation, en outre, peut déterminer des conséquences négatives en termes de réchauffement climatique global à cause de l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et peut provoquer aussi des changements microclimatiques draconiens qui comportent des altérations sur la productivité et la fonctionnalité des écosystèmes.

Souvent la déforestation est suivie d'une agriculture intensive qui exploite en manière non durable le sol en entraînant la perte complète de sa fertilité. Les processus de dégradation du sol sont le résultat de l'utilisation, parfois inadaptée, des moyens de production tels que les fertilisants et l'eau. En ce sens une autre aggravation de la situation a été causée récemment par les moyens mécaniques qui contribuent à compacter le terrain et réduisent la fertilité chimique et physique de la couche du sol labouré, ainsi que par la puissance des tracteurs qui permettent les aménagements artificiels des zones collinaires en provoquant des modifications de la morphologie naturelle du territoire et altérant donc les parcours naturels d'écoulement de surface. D'élément principal déterminant les choix de production, le substrat organique est devenu aujourd'hui un élément secondaire remplaçable de toute façon par des engrais artificiels produits industriellement. On néglige le rôle de la matière organique en tant qu'élément régulateur de la fertilité physique et micro biologique du sol, à cause des substances colloïdales sur la structure du terrain et de la capacité de rétention hydrique, deux éléments bénéfiques et en opposition avec les processus d'érosion superficielle

La zootechnie, surtout dans ses formes intensives, a modifié l'utilisation du territoire, causant d'une part des phénomènes de pollution à cause de la nécessité de l'élimination des déjections animales et de l'autre part une plus grande exploitation des zones pastorales, en particulier les zones les mieux desservies en eau, routes et services, avec les phénomènes secondaires de dégradation de la végétation, de compaction et d'érosion des sols. Inversement, dans d'autres zones moins plus difficiles d'accès, la sous-utilisation des pâturages naturels qui deviennent la conquête des bois est en train de se vérifier. Dans de nombreux pays à climat aride et semi-aride, l'activité zootechnique constitue le secteur principal de l'agriculture ; elle est considérée l'une causes majeures de désertification parce qu'elle est associée à l'emploi du feu pour le nettoyage des pâturages et à la culture inadaptée des terrains pauvres et fortement escarpés.

Suite à l'exploitation excessive de l'agriculture et de la zootechnie, le terrain devient improductif et du point de vue économique continuer à le cultiver n'est plus



rentable; ceci crée le phénomène connu de l'abandon des terres. En Europe méditerranéenne, les 4000 dernières années ont vu un fort accroissement des terres agricoles qui, en raison de mesures insuffisantes de conservation du sol, ont subi souvent des phases d'appauvrissement si intenses qu'elles ont été abandonnées. Dans l'histoire, ces phases ont été certaines fois en concomitance avec des phases d'explosion ou de contraction démographique. Le processus s'est intensifié en 1900, faisant que dans de nombreuses régions des terrains qui, 50 ans auparavant étaient plantés de céréales, de vignobles et d'oliviers, ne sont presque plus productifs et sont actuellement abandonnés.

Le processus d'abandon des terrains agricoles peut être associé aux facteurs liés à l'environnement physique, à la gestion territoriale et au contexte socio-économique. En ce qui concerne les facteurs de l'environnement, le facteur principal limitant est la disponibilité hydrique qui dépend des conditions climatiques et de la capacité de stockage hydrique du sol et qui limite par conséquent la croissance des plants. Les motivations socioéconomiques qui conduisent à l'abandon des terres peuvent être diverses. Le développement rapide des activités touristiques, l'urbanisation et l'intensification de l'agriculture dans les zones côtières de la Méditerranée ont déterminé la migration des zones situées plus à l'intérieur et par conséquent, l'abandon de nombreuses zones. En outre, la majeure partie des terrains peuvent difficilement se reprendre par eux-mêmes de la détérioration et leur abandon les expose ultérieurement au risque d'incendie, à l'érosion et aux formes de zootechnie très pauvres. Dans d'autres situations, les aides de l'Union Européenne, fournie en se basant sur le nombre de têtes de bétail, ont contribué à créer des phénomènes de surpâturage avec une dégradation consécutive du territoire et, dans les cas extrêmes, à l'abandon des terres. En synthèse, l'abandon des terres est en même temps un symptôme de la perte de fertilité du terrain et contribue à l'aggravement progressif du phénomène.

Étroitement lié au phénomène de l'abandon des terres, on citera le phénomène croissant de la littoralisation, définie comme la concentration des activités économiques et de l'urbanisation résidentielle dans les zones côtières suite à la

croissance urbaine, à celle des activités industrielles, du tourisme et de l'irrigation. Dans certains cas, ce processus peut être associé à l'abandon des habitats et des terres des zones situées plus à l'intérieur, créant une migration de la population de l'intérieur vers la côte. La littoralisation et l'abandon des terres constituent donc deux aspects de ce problème.

L'urbanisation des zones littorales peut s'avérer particulièrement risquée pour le contexte de l'environnement côtier qui présente lui-même des éléments de vulnérabilité considérablement intrinsèque; le fort prélèvement d'eau dans les zones côtières peut créer, en effet, un abaissement du niveau des nappes phréatiques, comportant l'infiltration de l'eau salée dans le sous-sol et la salinisation progressive des nappes; en outre se vérifie une exploitation intense des sols pour l'habitat, déterminant par conséquent la perte des utilisations traditionnelles du territoire.

L'urbanisation des zones côtières, souvent à proximité des embouchures des fleuves, expose ensuite la population au risque de crues et de désastres écologiques.

Ces problèmes de l'environnement fréquents en Méditerranéenne du Nord sont plus intenses dans ces zones où les politiques de développement économique ont favorisé le tourisme de masse pendant l'été, introduisant ainsi de nouveaux schémas d'urbanisation, caractérisés par l'augmentation de l'occupation du sol par habitant et par le standard de la qualité de vie plus exigeant. La pression exercée par ces mouvements de masse saisonnière provoque un impact sur le contexte de l'environnement, de l'économie et de la culture qui, dans certains cas, peut favoriser le développement mais dans d'autres favorise l'altération de fragiles équilibres. Depuis plus de quarante ans, les phénomènes d'abus immobilier, de type essentiellement résidentiel et qui malheureusement n'ont jamais été combattus efficacement, contribuent à la littoralisation non durable de nombreuses côtes.

Les incendies, presque toujours d'origine anthropique, sont une autre cause de la désertification ; ceux-ci, en effet détruisent les bois et les forêts qui ont mis des décennies ou des siècles à se former et qui récupèrent difficilement la richesse de la flore et de la faune qu'on y trouvait avant l'incendie. Les températures élevées provoquées par le feu peuvent aussi avoir des effets négatifs sur les propriétés

physiques et chimiques du terrain; celles-ci provoquent des modifications dans sa structure en le rendant moins perméable, il est donc plus exposé au processus de l'érosion. L'incendie aboutit à la formation de substances imperméables à la pluie qui accélèrent le glissement en surface et donc le transport de solides. De graves problèmes hydrologiques se développent presque systématiquement dans les brûlis en pente lors de la première saison pluvieuse qui suit immédiatement l'incendie, provoqués par l'effet de tels phénomènes chimiques et le manque de retenue du sol provenant du manque de racines. Pour comprendre la gravité du phénomène il suffit de citer que, dans la dernière décennie, seulement en Italie plus de 600.000 hectares de bois ont été perdus à cause des incendies.

Une mauvaise utilisation des ressources hydriques est l'une des causes principales de la désertification ; dans les pays, surtout industrialisés, on assiste souvent à une utilisation insensée de la ressource hydrique, caractérisée par les prélèvements excessifs et non planifiés ainsi que par la pollution ponctuelle et répandue d'origine urbaine, agricole et industrielle. Les pertes dans le réseau de distribution, qui dans certains cas atteignent des pourcentages élevés, constituent un autre grave aspect. L'augmentation des besoins hydriques due à la croissance de l'urbanisation, à l'augmentation de la consommation par habitant et au passage à une agriculture de type intensif a conduit à un prélèvement excessif dans les nappes souterraines, en provoquant l'abaissement de leur niveau. Ce phénomène peut produire des modifications dans les rapports hydrauliques entre les nappes souterraines et les cours d'eau en surface. Les problématiques associées à des modes d'irrigation intensifs ont été trouvées, par exemple, en Espagne dans le bassin de Guadalentin (Gonzalez Barbera, 2004) où, au cours des 50 dernières années, les terrains irrigués ont augmenté de plus de 150% et le taux de pompage est quatre fois supérieur par rapport à celui d'approvisionnement de la nappe, avec salinisation consécutive des eaux souterraines, due à la progressive intrusion des eaux salées dans la nappe aquifère. En Italie, la plaine côtière lucanienne a été intéressée par une intensification considérable des activités agricoles et par conséquent des pratiques irriguées rendues possibles par

la construction de retenues (Quaranta et Salvia, 2006) qui ont permis l'irrigation de nombreuses portions de territoire et donc la production de récoltes rentables.

L'industrie, l'urbanisation et le tourisme pèsent sur le phénomène de la désertification causant une réduction draconienne des zones naturelles et une forte demande des ressources hydriques, concentrées dans le temps et dans l'espace. L'industrialisation entraîne des dégâts très élevés surtout dans les pays où la norme, en termes de protection de l'environnement et du territoire, est labile voire inexistante. Dans ces pays généralement en voie de développement, assiste actuellement à la création de toute une série d'urgences environnementales au niveau mondial auxquelles il est difficile de remédier en raison du développement économique tumultueux et de la volonté de la population de s'approcher du modèle de vie occidentale avec une forte utilisation des ressources naturelles.

Les pluies acides sont une autre cause de la désertification ; ce sont essentiellement des précipitations contaminées par la présence d'acides qui se sont formés dans l'atmosphère et qui sont la conséquence du processus de combustion. La révolution industrielle, en effet, a fait augmenter considérablement les quantités d'anhydride sulfureux et d'oxyde d'azote diffusés dans l'air en raison de la consommation croissante de combustibles fossiles. Tout ceci a entraîné une augmentation du phénomène des pluies acides, aussi bien sous forme de précipitations que de dépôts secs.

En ce qui concerne les précipitations au niveau global, les nations plus atteintes sont celles sur lesquelles, par effet des vents dominants, se déchargent les nuages acides produits aussi dans les autres pays. Le problème est particulièrement grave pour le Canada qui reçoit les pluies acides des États-Unis, alors qu'en Europe les nations les plus atteintes sont les pays scandinaves. En Allemagne, plus de 8% de tout le patrimoine boisé a été gravement endommagé sinon compromis. En Italie, l'action des pluies acides est en partie compensée par la constitution particulière du terrain riche en carbonate de calcium qui neutralise les acides, les effets qui sont relevés dans les autres pays sont donc moindres ; le phénomène touche quoiqu'il en soit presque exclusivement la zone de la plaine du Pô.

Les dégâts causés par les pluies acides sur la végétation concernent aussi bien le terrain que les feuilles. Les feuilles représentent les parties de la plante les plus exposées et vulnérables à l'action des polluants de l'air, car ils sont le siège des échanges gazeux. En traversant les stomates, les gaz et les autres substances toxiques qui se déposent sur la feuille pénètrent à l'intérieur et se dissolvent dans le voile liquide intercellulaire qui imprègne les parois des cellules du mésophyle ; de là, ils se dispersent dans la feuille où ils peuvent s'accumuler en concentrations toxiques.

En ce qui concerne l'action toxique des pluies acides sur les terrains, celle-ci doit être imputée surtout à l'anhydride sulfureux qui, en tombant sur le terrain sous forme de précipitations ou de dépôts secs, provoque l'acidification du sol. En raison du pH acide, l'ion aluminium, capable de remplacer le calcium de ses lieux de fixation sur les poils absorbants des plantes se libère dans le terrain; il s'ensuit une réduction de l'apport de nutriments et la plante s'affaiblit considérablement, s'exposant à l'attaque des insectes, aux maladies et aux variations climatiques excessives. Ces phénomènes s'observent en particulier dans les zones à sol plus mince et dans les zones à plantes plus exposées aux intempéries, comme en haute montagne. Par ailleurs, après la mort des arbres, les racines et le feuillage ne protègent plus le sol contre l'érosion causée par les précipitations ; par conséquent, les forêts sujettes aux pluies acides vont à sont exposées à une érosion successive du terrain, comme dans le cas des incendies qui en compromettent la future récupération.

Les substances acides contenues dans l'eau de pluie causent aussi des dommages aux eaux des fleuves et des lacs: à cause de l'acidité des pluies ceux-ci sont alors pollués par les métaux, rendus solubles par réactions chimiques. Le pH d'un lac, qui est normalement égal 8, avec les pluies acides et la fonte des neiges au printemps diminue et cause des dégâts considérables. En effet, au-dessous d'un pH de 5,5 la majeure partie des poissons, des crustacés et des mollusques meurt. Pour avoir une idée du phénomène, on peut souligner que 140 lacs au Canada sont désormais dépourvus de vie, 107 en Finlande et 1750 en Norvège sont en danger.

Ces 50 dernières années, avec l'intention théorique de réaménager les zones dégradées de nombreuses régions d'Europe des espèces exotiques non adaptées pour

la typologie du sol et du climat ont été réintroduites. Dans ces cas, on a vérifié une érosion plus prononcée dans les zones collinaires ou montagneuses et une diminution draconienne du nombre des espèces locales, avec de graves répercussions sur la biodiversité. Donc pour défendre les zones à risque il faut trouver et utiliser les espèces végétales autochtones en rétablissant, lorsque cela est possible, la végétation naturelle.

## **Chapitre 4 - Caractérisation des processus de sécheresse et de désertification à l'échelle régionale**

**Pr Goffredo La Loggia, Ingénieur Leonardo Noto**

**Département de Génie Hydraulique et d'Applications Environnementales - DIIAA,  
Université des Études de Palerme**

### **4.1 Données**

La recherche de *tendances* dans les séries de variables climatiques nécessite l'utilisation de données satisfaisant des caractéristiques déterminées ; dans l'analyse des données historiques, il est notamment nécessaire d'observer : la répartition spatiale des stations sur le territoire, la longueur et la complétude de la série temporelle, la qualité et l'homogénéité des données. Dans le choix des stations à insérer dans l'étude des *tendances* à l'échelle régionale, il faut disposer d'un réseau de stations de mesure qui soit le plus uniforme possible du point de vue spatial. La longueur de la série doit être adaptée aux objectifs de l'analyse : Le WMO (*World Meteorological Organization*), conseille à ce sujet d'utiliser des séries temporelles d'au moins 30 ans. L'étude des tendances de grandeurs climatiques et hydrologiques nécessite par ailleurs l'utilisation de séries historiques complètes. Les données historiques présentent souvent des interruptions liées à de multiples facteurs. Il est, dans ces cas, possible d'utiliser des techniques opportunes d'interpolation pour reconstruire les données manquantes.

Dans la présente étude, des données de précipitations mensuelles relatives à 247 stations réparties sur tout le territoire sicilien ont été utilisées, fournies par l'Observatoire des Eaux (OA-ARRA) de Sicile. La période analysée comprend les années 1921-2000. Ces données s'avèrent incomplètes, car aucune station n'a fonctionné sans interruption pendant la période étudiée. Afin d'obtenir des séries historiques continues, il a été nécessaire de soumettre les séries à un procédé d'interpolation qui a permis d'utiliser un *groupe de données* complet et homogène

(Bono, 2005). Les données mensuelles de départ ont été interpolées par le biais d'une technique qui associe un modèle stochastique à une méthode de type déterministe : La spatialisation des données a tout d'abord été effectuée par le biais d'une régression linéaire, puis le *krigeage* a été appliqué aux « résidus » obtenus sur les points connus, de sorte à corriger l'erreur du modèle, entendant par le terme résidus les différences entre la précipitation prévue en chaque point d'échantillonnage et la précipitation estimée par le modèle déterministe.

Concernant l'analyse des *tendances* thermométriques, on a utilisé les données de température moyenne annuelle et mensuelle fournies par l'Observatoire des Eaux (OA-ARRA) de Sicile, relatives à plus de 80 stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire sicilien pendant la période 1924-2006. Ces séries étaient également incomplètes et ont donc été soumises à un procédé d'interpolation, qui a permis d'obtenir un *groupe de données* complet et homogène. Les séries historiques ont notamment été reconstruites à l'aide d'un rapport altitudes/températures et d'un interpolateur spatial géostatistique, le *Residual Ordinary Kriging* (Varvaro, 2007).

## 4.2 Méthodologies

### 4.2.1 Test de vérification de l'existence d'une tendance

La présence d'une *tendance* dans les séries historiques a été vérifiée par l'application du *test* non paramétrique de Mann-Kendall. Utilisé à l'origine par Mann (1945) et modifié par la suite par Kendall (1962), ce *test* permet de rechercher la présence d'une tendance de longue durée dans les données climatiques sans nécessité de rechercher sur le mode de distribution de ces données. Par ailleurs, les *tests* non paramétriques sont en général moins influencés par la présence d'éventuelles *aberrations* dans les séries historiques.

Le *test* non paramétrique de Mann-Kendall permettant de trouver l'existence d'une *tendance* monotone mais ne permettant pas de la quantifier, il a été effectué une estimation incisive du coefficient angulaire  $\beta$  de la droite interpolant les données



(Hirsh et al., 1982) par l'expression :

$$\beta = \text{Mediane} \left[ \frac{(y_j - y_i)}{(j - i)} \right] \quad \forall i < j \quad [4.a]$$

#### 4.2.2 Test à échelle zonale

Le *test* de Mann-Kendall a été aussi appliqué pour déterminer des *tendances* à l'échelle zonale.

Lettenmaier et al. (1994) ont souligné que l'effet de l'éventuelle présence de corrélation croisée spatiale dans les données est d'influencer la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle lorsque celle-ci est vraie, celle-ci influence donc la capacité du *test* de déterminer correctement la signification de la *tendance* ; dans l'application d'un *test* statistique, il est d'ailleurs très important de tenir compte du niveau de confiance des résultats obtenus (Livezey et Chen, 1984). Il est également possible, pour évaluer la présence de *tendance* à l'échelle zonale sans les inconvénients dont on a parlé, d'utiliser une procédure *bootstrap* (Efron, 1979), qui permet de reconstruire la fonction de répartition empirique de la statistique  $S_m$ , dans le but d'évaluer le niveau de confiance associé à la valeur de  $S_m$  calculée à partir de données historiques. La méthode *bootstrap*, utilisée à de nombreux effets dans le domaine scientifique, repose sur un échantillonnage simple avec répétition sur un échantillon composé de  $k$  données. L'échantillon *bootstrap* est obtenu à partir de l'échantillon initial, par une extraction avec répétition, qui fait que certaines données soient répétées et d'autres soient absentes, de sorte à conserver le même nombre d'observations. Ce mode d'extraction génère une variabilité des estimations ; au travers d'un unique échantillon disponible, de nombreux autres échantillons sont ainsi générés, permettant de construire la distribution empirique de référence et donc de calculer le niveau de signification associé à la valeur de  $S_m$  ; bien entendu, si celui-ci s'avère supérieur au niveau de signification préétabli, l'hypothèse d'absence de *tendance* dans la zone étudiée est alors acceptée.

### 4.3 Analyse des tendances des séries de précipitation (1921-2000)

Pour chacune des 247 stations pluviométriques prises en compte dans cette analyse, la présence d'une *tendance* des afflux annuels, mensuels et saisonniers a été vérifiée. Les afflux mensuels ont été regroupés en afflux saisonniers comme indiqué ci-après :

- Hiver - décembre, janvier, février ;
- Printemps - mars, avril, mai ;
- Été - juin, juillet, août ;
- Automne - septembre, octobre, novembre.

La figure 4.1 illustre la répartition spatiale des 247 stations pluviométriques utilisées dans l'étude ; par ailleurs, une échelle de couleurs souligne la variabilité de la précipitation moyenne annuelle dans la région. Les valeurs les plus élevées se concentrent dans la province de Messine et de Palerme et atteignent la valeur maximale de près de 1270 mm, alors que les plus basses se retrouvent le long de la côte méridionale et atteignent la valeur minimale de 400 mm.

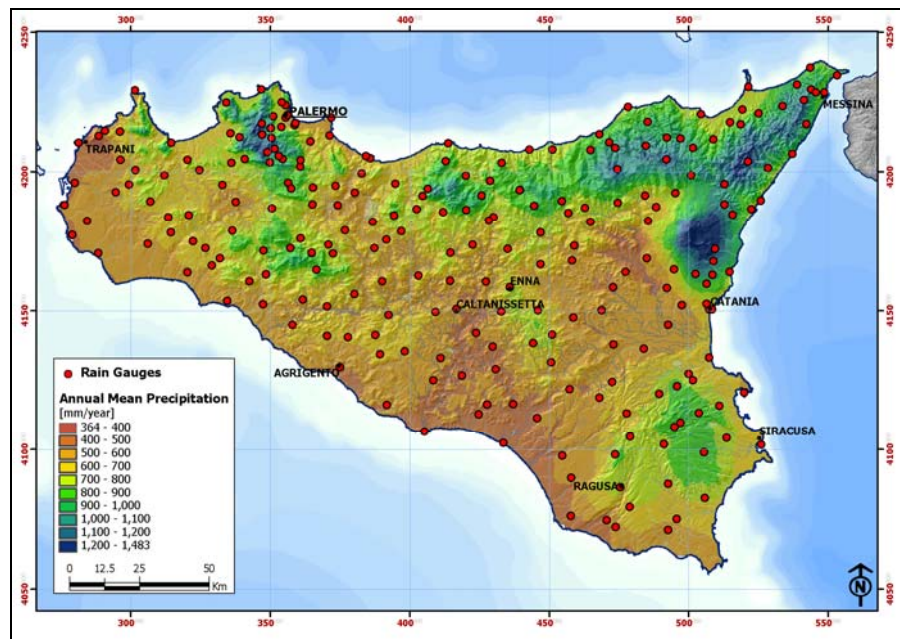


Fig. 4.1- Moyenne des afflux totaux annuels pour la période 1921-2000.

Dans le cas des stations de Messine qui notent les plus fortes valeurs moyennes de pluie annuelle, on peut noter que celles-ci, la plupart du temps, ne présentent pas de *tendances* significatives pour aucun des trois niveaux de confiances pris en examen. Les stations de la province de Palerme montrent en revanche des valeurs de pluie moyenne annuelle plus élevées que les autres stations siciliennes, mais elles sont aussi caractérisées par des décréments qui s'avèrent significatifs jusqu'à 99%.

Pour une visualisation plus immédiate, les résultats ont été représentés dans un diagramme à barres, dans lequel a été indiqué le nombre de stations pluviométriques qui présentent des *tendances* pour chaque niveau de signification fixé et le nombre de stations sans *tendance* (Fig. 4.2). La barre des *tendances* nulles est divisée en trois parties, chacune se rapportant respectivement à un niveau de confiance de 90%, 95% et 99%.

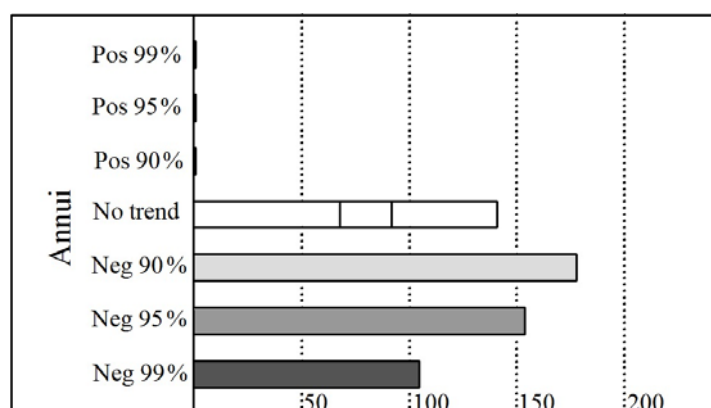


Fig. 4.2 - *Tendances* observées dans les précipitations annuelles aux niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

L'histogramme montre que la plupart des stations présentent une *tendance* négative pour tous les niveaux de confiance pris en compte. Notamment, 62% des stations analysées (155 stations) montrent des *tendances* significatives à 95%. Les stations pour lesquelles le *test* n'a pas relevé de *tendance* significative varient d'un minimum de 68 (pour un niveau de confiance de 90%) à un maximum de 141 (en considérant un niveau de confiance de 99%). Dans le cas des stations de la zone de Messine où l'on

retrouve les plus fortes valeurs moyennes de pluie annuelle, il n'existe pas, dans la plupart des cas, de *tendances* significatives pour aucun des trois niveaux de confiance pris en compte, alors que pour les stations de la province de Palerme, elles aussi caractérisées par des valeurs de pluie moyenne annuelle particulièrement élevées, des décréments qui s'avèrent significatifs jusqu'à 99% ont été notés. Le décrément le plus significatif a été observé dans la station de Buccheri, sur le versant oriental de l'île où, sur les quatre-vingt dernières années, la précipitation a diminué en moyenne de 7.65 mm/an, alors que la seule station qui présente une *tendance* positive est celle d'Erice, sur l'extrême pointe Nord-Ouest de la Sicile, avec une augmentation moyenne annuelle de 2,86 mm.

L'analyse des *tendances* a aussi été menée sur les afflux saisonniers. Les résultats illustrés en Figure 4.3 montrent que l'hiver est la saison qui présente le plus grand nombre de *tendances* négatives et que l'été est une saison pratiquement dépourvue de *tendances*.

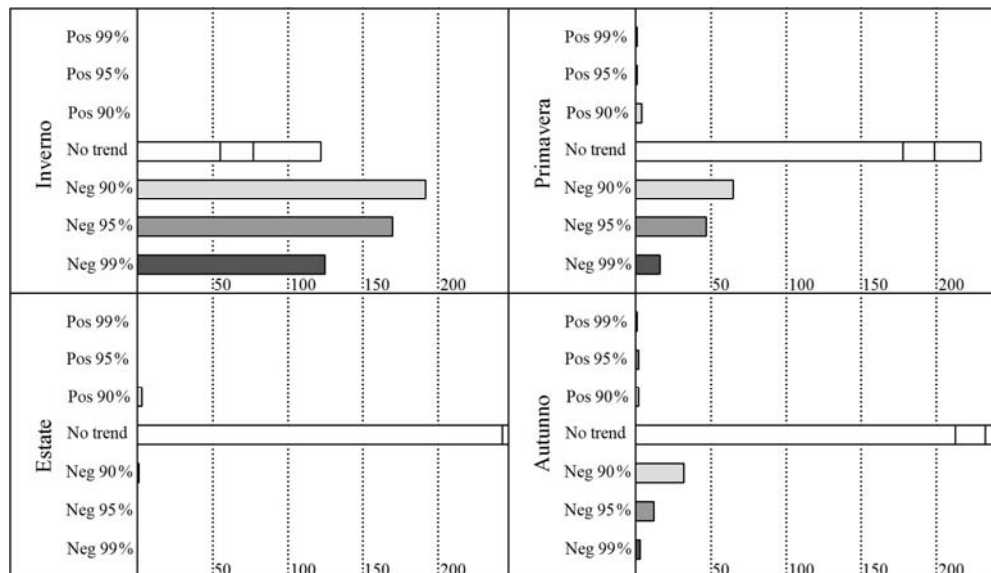


Fig. 4.3 - *Tendances* observées dans les afflux saisonniers aux niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

En hiver, près de 60% des stations sont concernées par une *tendance* négative avec un niveau de confiance de 95%. Ce résultat correspond pratiquement à celui rencontré

dans l'étude à l'échelle annuelle et ceci conduit à affirmer que la réduction observée dans les précipitations annuelles est essentiellement liée à la diminution des pluies au cours du trimestre hivernal. Ce comportement est à imputer au climat typiquement méditerranéen de l'île, caractérisé par le fait que plus de 40% des précipitations se concentrent sur les mois de décembre, janvier et février. L'analyse des résultats obtenus pour les afflux mensuels montre des comportements extrêmement différents d'un mois à l'autre (Fig. 4.4) ; en effet, même à cette échelle temporelle, on observe quelquefois un nombre important de stations à *tendance* significative et parfois une absence totale de *tendance*.

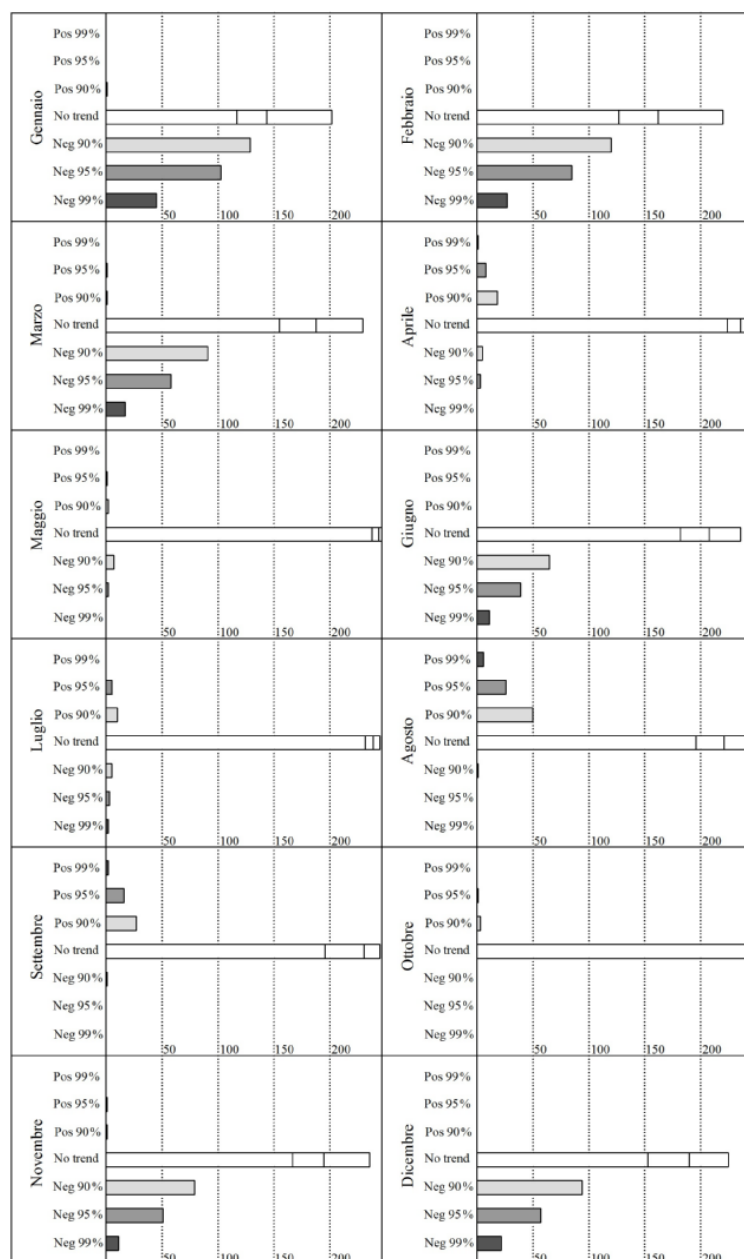


Fig. 4.4 - *Tendenze* osservate nelle precipitazioni mensili ai livelli di confidenza del 90%, 95% e 99%.

Notamment, pour un niveau de confiance de 95%, les mois de janvier et février sont caractérisés par une *tendance* négative dans 50% des stations, alors qu'au cours des mois de mars, juin, novembre et décembre, ce taux baisse à 35%. Les seuls mois au cours desquels on a noté l'existence de *tendenze* positives sont août et septembre, avec 10-20% des stations à *tendance* significative à 95%.

Après avoir déterminé les *tendances sur site*, il a été procédé à la spatialisation des résultats sur l'ensemble du territoire sicilien. Par la méthode IDW, des cartes ont été créées et sur chacune d'elles la répartition spatiale d'une grandeur déterminée dans la zone étudiée a été représentée. La représentation spatiale des résultats permet donc une meilleure compréhension de la répartition des *tendances* et de voir des zones dans lesquelles des phénomènes analogues se produisent.

Le niveau de signification local *p-value* pour chaque tendance a été interpolé sur la zone étudiée à l'aide de la méthode de l'*Inverse Distance Weighting* (IDW). La Figure 4.5 montre le résultat obtenu en relation avec les *p-values* pour les *tendances* annuelles. Celle-ci permet de déduire que la partie Sud-ouest de la Sicile est caractérisée par la présence de *tendances* à haut niveau de confiance, compte tenu qu'on y trouve les plus basses valeurs du paramètre ; inversement, les *tendances* de la zone Est montrent un niveau de confiance en moyenne beaucoup plus bas.

La carte illustrée en Figure 4.6 permet de voir immédiatement les stations qui présentent une *tendance* et le niveau de confiance correspondant. Comme on peut le constater, la répartition sur le territoire des zones où l'on a trouvé une *tendance* par niveau préétabli de signification n'est pas régulière.

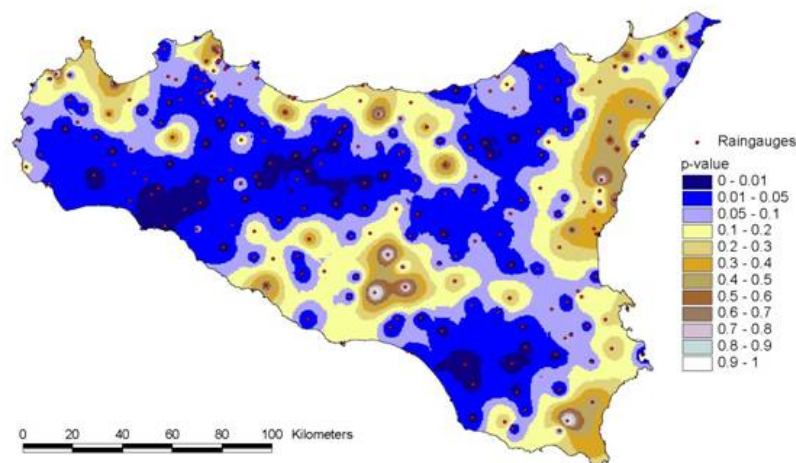


Fig. 4.5 - Répartition spatiale des *p-values* pour les précipitations annuelles (1921-2000).

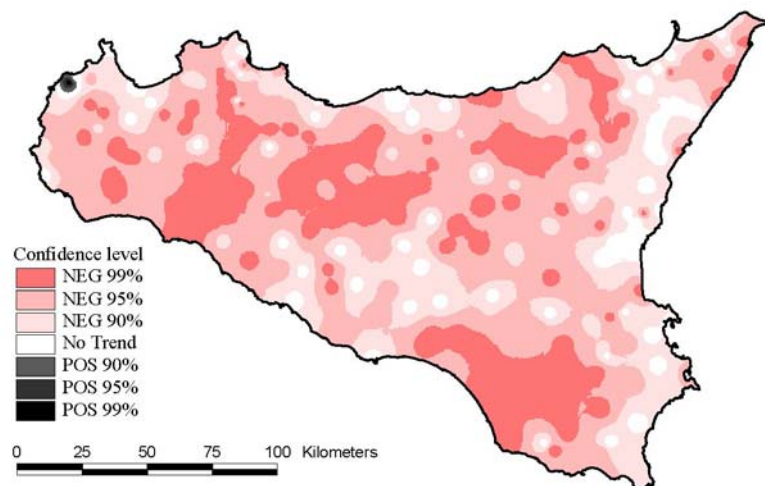


Fig. 4.6 - Répartition spatiale des *tendances* retrouvées dans les afflux annuels avec le *test* de Mann-Kendall et niveau de confiance correspondant.

La comparaison de la carte des *p-values* à celle des *tendances* met en évidence la façon dont existe une correspondance logique entre les zones où l'hypothèse d'absence de *tendance* est acceptée et les zones où la *p-value* prend des valeurs plus élevées, car plus la valeur prise par cette grandeur est grande, plus grande est l'évidence en faveur de l'hypothèse nulle. Une fois la répartition spatiale de la *p-value* connue, il a été possible de réaliser des cartes en superposant la carte où sont indiqués les coefficients angulaires des droites de régression sur les afflux totaux annuels sur une carte qui montre les zones où la *p-value* prend des valeurs supérieures au niveau de signification affecté, à savoir les régions où l'éventuelle *tendance* n'est pas significative ; autrement dit, dans ces représentations spatiales les coefficients angulaires des droites de régression uniquement pour les séries des afflux annuels qui présentent des *tendances* significatives sont indiqués.

Dans la carte illustrée en Figure 4.7 la répartition spatiale du coefficient angulaire  $\beta$  par niveau de confiance fixé, notamment de 95%, calculé à l'aide de la 4.a a été indiquée. En blanc, les régions qui ne montrent aucune *tendance* ont été indiquées.



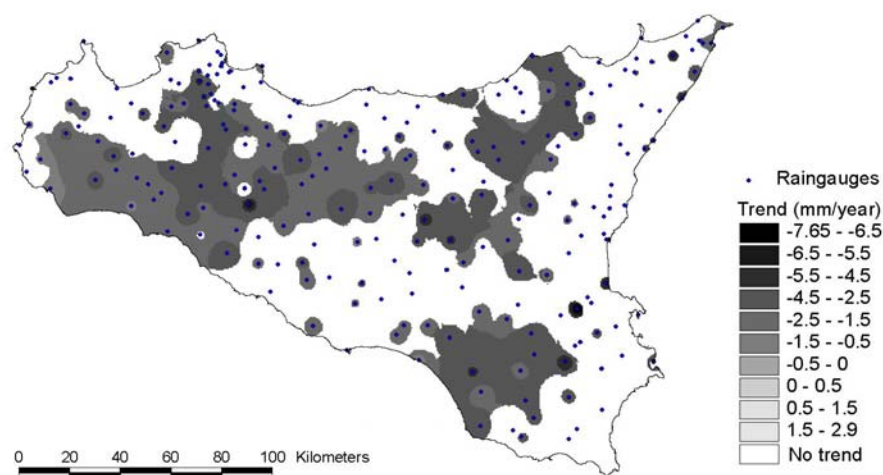


Fig. 4.7 - *Tendances* sur les afflux annuels pour un niveau de confiance de 95% et coefficient angulaire correspondant.

On note la présence de certaines zones isolées dépourvues de *tendances* significatives et trois grandes zones à *tendances* significatives, qui couvrent près de 35% du territoire sicilien et s'avèrent réparties de façon irrégulière au point de ne pas sembler imputables à des conditions géographiques ou morphologiques particulières. La présence de ces zones contiguës à *tendances* significatives constitue une confirmation des résultats *sur site*, toutefois l'existence d'un petit nombre de stations disséminées sans aucune corrélation spatiale, où la *tendance* est absente, suscite un doute légitime sur la signification statistique et physique de ce résultat. Pour cette raison, la répartition spatiale des *tendances*, influencée par la méthode d'interpolation utilisée, n'est pas suffisamment claire, toutefois les valeurs élevées des coefficients angulaires conduisent à estimer que les résultats sont fiables.

Il a déjà été évoqué qu'au cours de la saison hivernale, de nombreuses stations montrent une *tendance* décroissante, alors qu'au cours des autres saisons, aucune tendance particulière n'a été constatée. La répartition spatiale des *tendances* du trimestre hivernal a donc été étudiée. Les résultats, représentés en Figure 4.8, mettent en évidence un comportement différent entre les parties Est et Ouest de l'île.

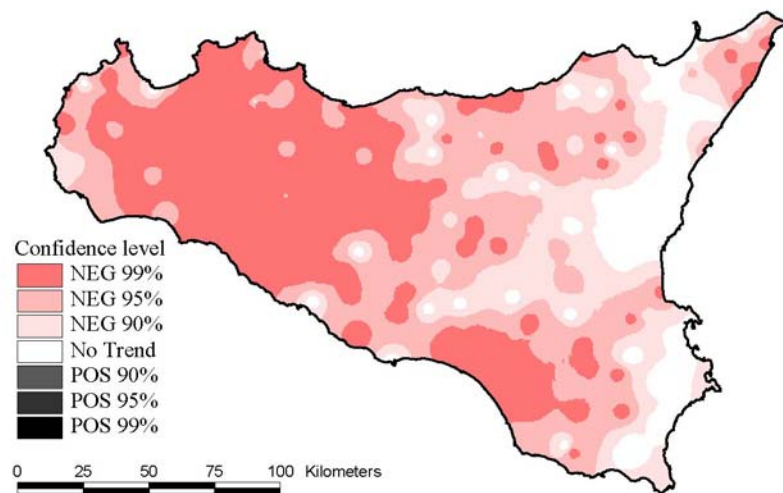


Fig. 4.8 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall sur les afflux hivernaux et niveau de confiance correspondant.

Bien que presque tout le territoire étudié soit sujet à une réduction des afflux hivernaux, cette *tendance* est moins significative dans la zone Est, alors que dans la plus grande partie de la zone Ouest, le niveau de confiance est de 99%.

Une analyse spatiale analogue a été réalisée en se référant aux afflux de chaque mois. Tel que déjà affirmé, janvier est le mois concerné par le plus grand nombre de *tendances* significatives négatives (Fig. 4.9).

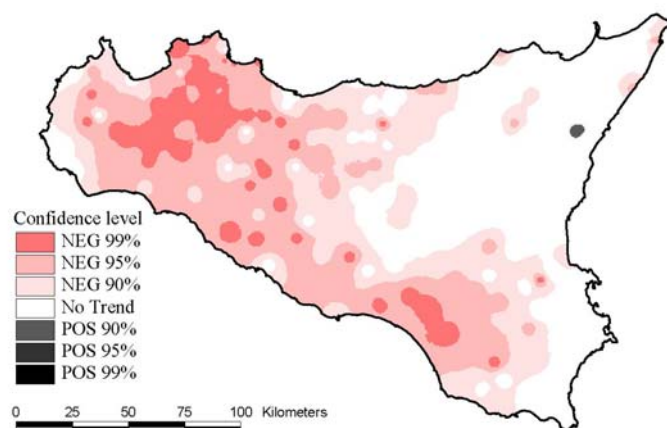


Fig. 4.9 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall sur les afflux de janvier et niveau de confiance correspondant.

Comme pour les afflux hivernaux, l'île apparaît divisée de façon visible en deux zones principales, la zone Est, où l'on n'observe pas de *tendances* négatives, et la zone Ouest, où l'on trouve d'importantes diminutions des afflux, réparties non uniformément dans l'espace ; toutefois le *modèle* spatial des tendances négatives est moins marqué par rapport à celui que l'on observe durant la saison hivernale.

Par comparaison de la répartition spatiale des *tendances* du mois de janvier, illustrée en Figure 4.9, à la répartition observée pour les *tendances* du mois d'août (Figure 4.10) qui est le seul mois qui présente une vaste zone caractérisée par des *tendances* croissantes significatives, il ressort une certaine correspondance entre les zones. Il semble en effet que les zones qui ont connu une *tendance* négative significative en janvier ne fassent ressortir aucune *tendance* positive en août et inversement, les zones qui ont connu une *tendance* positive en août ne présentent aucune *tendance* négative en janvier.

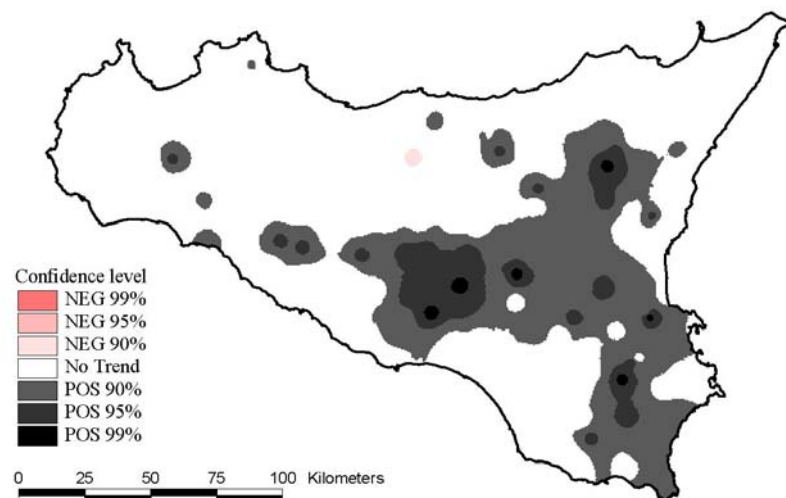


Fig. 4.10 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall sur les afflux d'août.

Afin d'évaluer les *tendances* à l'échelle régionale, deux méthodes ont été appliquées : le *test* de Mann-Kendall à l'échelle zonale et la technique *bootstrap*. L'analyse a été menée en se basant sur les afflux annuels, mensuels et saisonniers et pour les trois niveaux de confiance pris en compte dans l'analyse *sur site*.

Notamment, l'analyse effectuée sur les précipitations annuelles, en tenant compte l'ensemble du territoire, a donné une valeur de la statistique de Mann-Kendall  $S_m$  de -563. La comparaison de cette valeur à la fonction de répartition empirique de  $S_m$ , indiquée en Figure 4.11, permet de déduire que celle-ci est inférieure au quantile 95%, égale à -298 ; ceci entraîne le rejet de l'hypothèse nulle. On peut donc conclure que la Sicile est caractérisée par une *tendance* régionale négative avec un niveau de confiance de 95%.

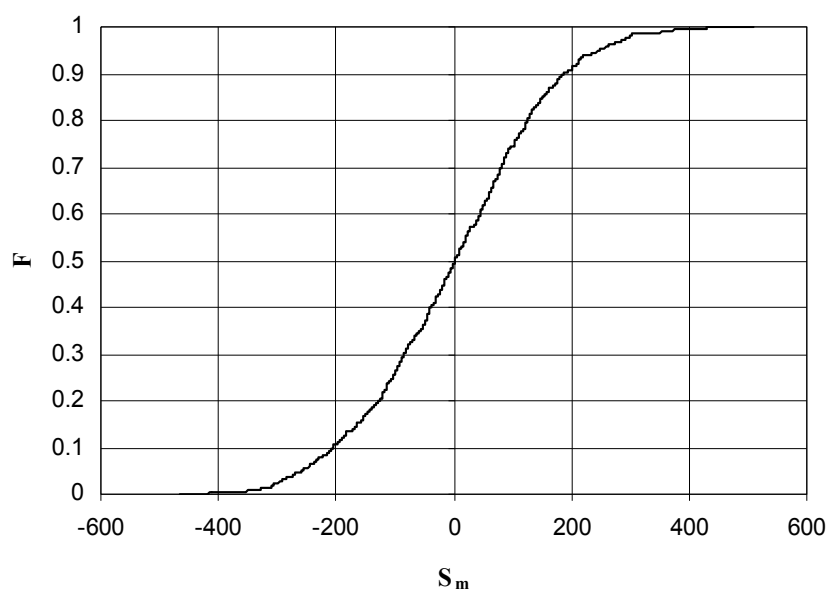


Fig. 4.11 - Fonction de répartition empirique de la statistique  $S_m$  relative aux afflux annuels.

Les résultats de toutes les analyses à caractère régional sont indiqués de façon synthétique dans le Tableau 4.1. Dans ce tableau, le symbole "TMK" indique le *test* de Mann-Kendall, le symbole "TB" indique l'analyse *bootstrap* et les points indiquent les cas où, l'hypothèse nulle étant rejetée, la présence de *tendances* a été constatée.

L'observation de l'ensemble des résultats permet de faire ressortir une certaine différence entre les résultats obtenus avec les deux procédures utilisées. L'application du *test* de Mann-Kendall aboutit notamment à un nombre de *tendances* régionales à toutes les échelles temporelles prises en compte. Il est cependant intéressant de souligner que, à l'échelle annuelle, la *tendance* régionale existe pour tous les niveaux

de confiance pris en compte et pour les deux procédures appliquées; cet élément constitue une nouvelle confirmation de la réduction présumée des précipitations en Sicile sur les quatre-vingt dernières années. Pour les afflux de janvier, février et de la saison hivernale, la présence de *tendances* à l'échelle régionale est confirmée, avec les deux *tests*, à un niveau de confiance de 95%.

	$\alpha = 0,1$		$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,01$	
	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>
ANNUI	•	•	•	•	•	•
GENNAIO	•	•	•	•	•	
FEBBRAIO	•	•	•	•	•	
MARZO	•	•	•		•	
APRILE						
MAGGIO						
GIUGNO	•		•		•	
LUGLIO						
AGOSTO	•		•		•	
SETTEMBRE	•		•			
OTTOBRE						
NOVEMBRE	•	•	•		•	
DICEMBRE	•	•	•		•	
INVERNO	•	•	•	•	•	
PRIMAVERA	•		•		•	
ESTATE						
AUTUNNO						

Tab. 4.1 - Résultats des *tests* à l'échelle régionale. Le point indique l'existence de *tendances*.

En plus du test de Mann-Kendall, il a été aussi décidé d'appliquer aux données la technique *bootstrap*, dans le but de vérifier les méthodes d'interpolation spatiale utilisées pour compléter le *groupe de données* initial (Bono *et al.*, 2005), il n'a pas été introduit de corrélation spatiale parasite qui risquait d'influencer l'analyse des *tendances*. À ce sujet, une autre analyse a été réalisée sur un *sous-groupe* constitué de 50 stations avec le plus petit nombre de données interpolées. Les résultats montrent que, à l'échelle annuelle, les *tendances* existent pour tous les niveaux de confiance

pris en compte, en appliquant les deux procédures ; cet élément constitue une nouvelle confirmation de la présence de *tendances* négatives des pluies en Sicile sur la période de quatre-vingt ans examinée.

#### 4.4 Analyse des tendances des séries de température (1924-2006)

L'analyse *sur site* des tendances a été réalisée en utilisant des données moyennes annuelles, mensuelles et saisonnières de 83 stations météorologiques siciliennes sur la période 1924-2006. La Figure 4.12 illustre la répartition spatiale des 83 stations thermométriques utilisées dans l'étude et, au moyen d'une échelle de couleurs, la variabilité de la température moyenne annuelle dans la région est mise en évidence.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse des *tendances* des températures moyennes annuelles sont schématisés en Figure 4.13 où, par niveau de confiance affecté, le nombre de stations à *tendance* positive, négative ou nulle a été indiqué. La barre des *tendances* nulles est divisée en trois parties, chacune d'elles se référant respectivement à un niveau de confiance de 90%, 95% et 99%. Les histogrammes montrent que la plupart des stations sont concernées par des *tendances* positives à tous les niveaux de confiance. 76% des 83 stations prises en compte montrent une *tendance* croissante avec un niveau de confiance de 95%. 22% des stations (18 sur 83) ne présentent pas de *tendance* avec un niveau de confiance de 90%.

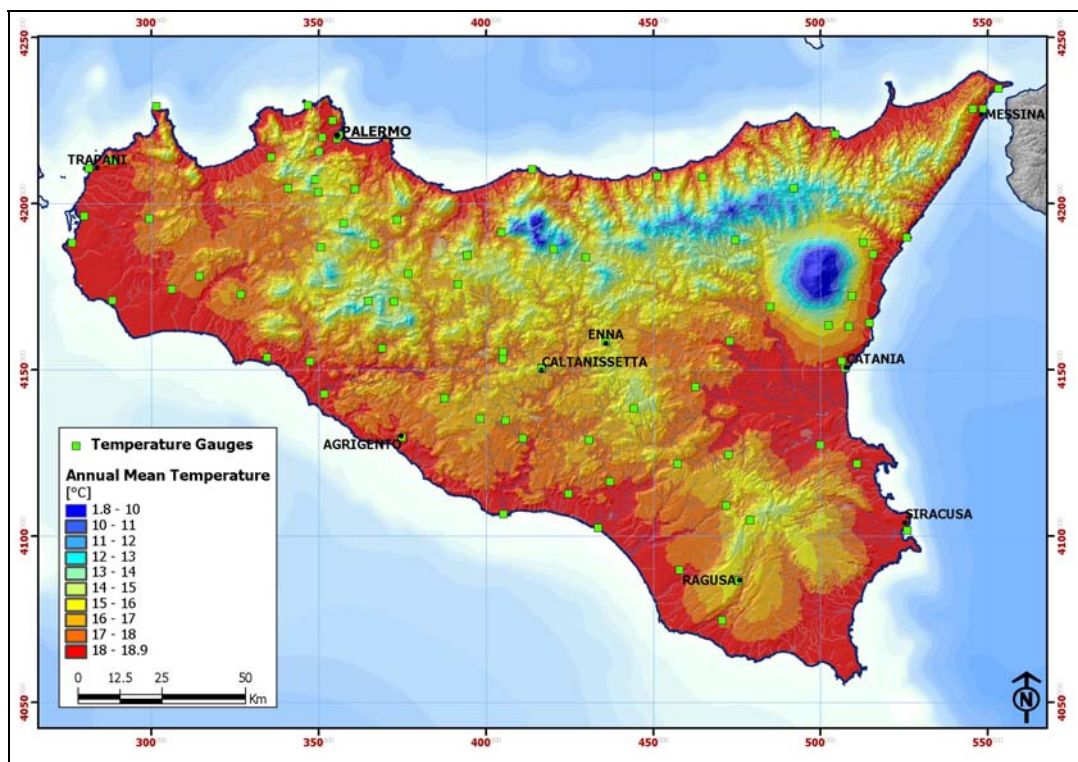


Fig. 4.12 - Températures moyennes annuelles pour la période 1924-2006.

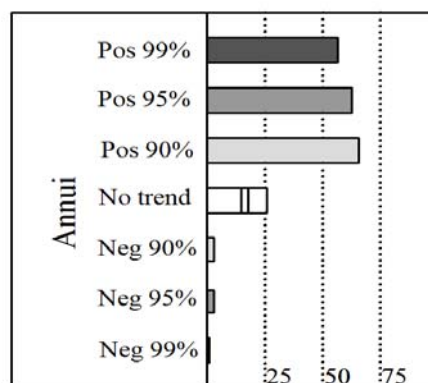


Fig. 4.13 - Tendances observées dans les températures annuelles aux niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

L'analyse des *tendances* a aussi été effectuée avec des données moyennes saisonnières. Les graphiques en Figure 4.14 illustrent les résultats obtenus, qui montrent un incrément des températures moyennes au cours de toutes les saisons et particulièrement lors des saisons hivernales. Près de 81% des stations (67 sur 83) présentent une *tendance* hivernale positive avec niveau de confiance de 95% et ce

pourcentage correspond environ à celui qui affiche une *tendance* positive au même niveau de confiance mais à l'échelle annuelle.

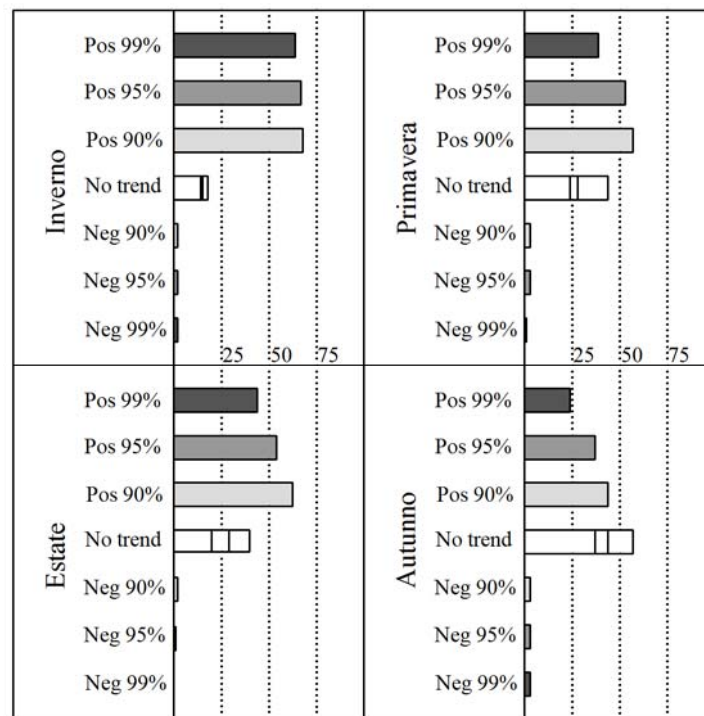


Fig. 4.14 - *Tendances* observées dans les températures moyennes saisonnières aux niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

L'analyse à l'échelle mensuelle a permis de constater la présence de *tendances* croissantes au cours des mois d'hiver, à savoir décembre, janvier et février, au cours des mois d'été, de juin à août et, enfin, au cours des mois de mai et d'octobre (Fig. 4.15).



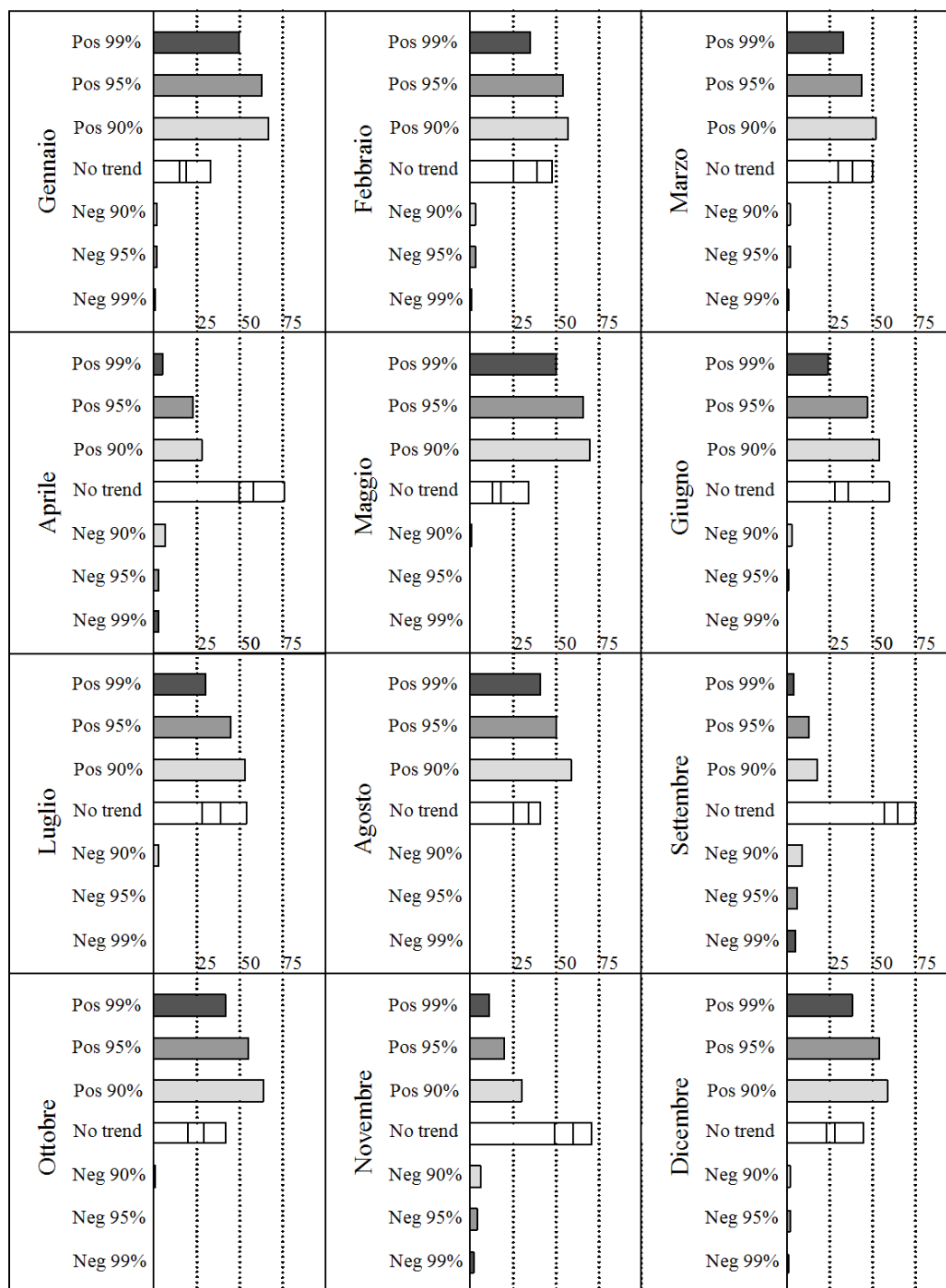


Fig.4.15 - *Tendenze* osservate nelle temperature medie mensili  
 ai livelli di fiducia del 90%, 95% e 99%.

Afin d'analyser la répartition spatiale des *tendances*, les résultats obtenus ont été interpolés spatialement sur l'ensemble du territoire sicilien par la technique de l'*Inverse Distance Weighted*, ou IDW. Comme pour l'analyse des *tendances* de précipitation, cette méthode a permis de créer des cartes relatives aux *modèles* spatiaux à toutes les échelles temporelles prises en compte, dont quelques exemples sont reportés ci-après. La Figure 4.16 montre les résultats du *test* de Mann-Kendall appliqué aux températures annuelles. La plus grande partie de la région est concernée par la présence d'une *tendance*. Les *tendances* au niveau de confiance le plus élevé sont concentrées dans la partie orientale de l'île (Fig. 4.16). L'entité de la *tendance* a été représentée sur une carte (Fig. 4.17) sur laquelle, par niveau de confiance fixé, a été indiquée la répartition spatiale du coefficient angulaire  $\beta$  calculé à l'aide de la (4.a). En gris, les régions qui ne montrent aucune *tendance* ont été indiquées. Le plus fort incrément de température observé est de 0.035°C/an. La plus grande partie de la région étudiée est concernée par une variation comprise entre 0.01 et 0.02 °C/an.

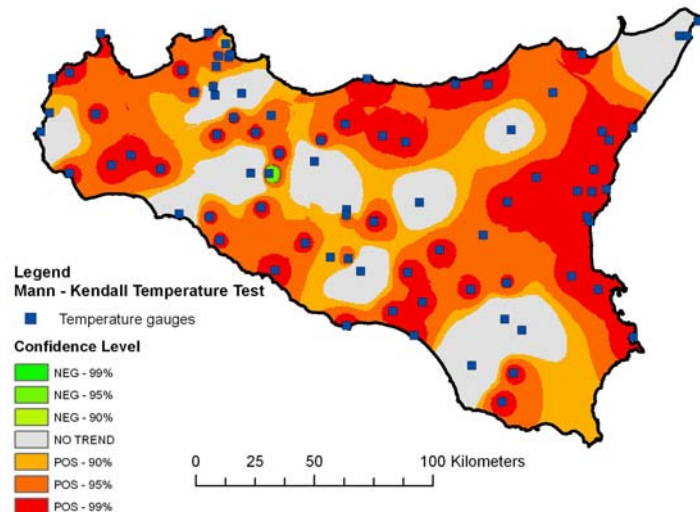


Fig. 4.16 - *Tendance* des températures moyennes annuelles sur la période 1924-2006 et niveau de confiance correspondant.

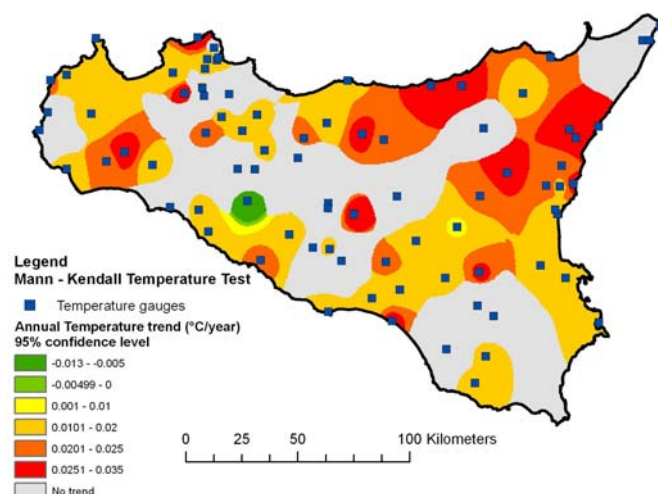


Fig. 4.17 - *Tendances* sur les températures moyennes annuelles pour un niveau de confiance de 95% et coefficient angulaire correspondant.

Dans l'objectif d'évaluer les *tendances* à l'échelle régionale, deux méthodes ont été appliquées : le *test* de Mann-Kendall à l'échelle zonale et la technique *bootstrap*. L'analyse a été réalisée sur la base des températures moyennes annuelles, mensuelles et saisonnières. Les deux méthodes ont trouvé la présence d'une *tendance* régionale dans le cas des températures moyennes annuelles et hivernales. Dans la plupart des autres cas, seul le *test* zonal de Mann-Kendall retrouve la présence d'une *tendance* régionale, alors que la technique *bootstrap* affirme l'absence de *tendance* (Tab. 4.2).

L'analyse des anomalies des températures moyennes sur la période 1961-1990 met en évidence la présence d'une tendance généralisée à l'augmentation (Fig. 4.18). Cette *tendance* s'observe soit sur toute la série, soit sur les séries obtenues en ne prenant en compte que les 50 et 25 dernières années. Si l'on considère notamment la série entière, on observe un incrément de 0,14°C/décade. L'incrément apparaît plus rapide au cours des 50 dernières années (0,35°C/décade) et sur les 25 dernières années (0,52°C/décade).

	$\alpha = 0,1$		$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,01$	
	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>
ANNUI	•	•	•	•	•	•

GENNAIO	•	•	•	•	•	
FEBBRAIO	•	•	•	•	•	
MARZO	•	•	•		•	
APRILE						
MAGGIO	•		•		•	
GIUGNO	•		•		•	
LUGLIO	•					
AGOSTO	•		•		•	
SETTEMBRE						
OTTOBRE						
NOVEMBRE	•		•		•	
DICEMBRE	•	•	•	•	•	
INVERNO	•	•	•	•	•	
PRIMAVERA	•		•		•	
ESTATE	•		•		•	
AUTUNNO						

Tab. 4.2 - Risultati des *tests* à l'échelle régionale. Le point indique l'existence de *tendances*.

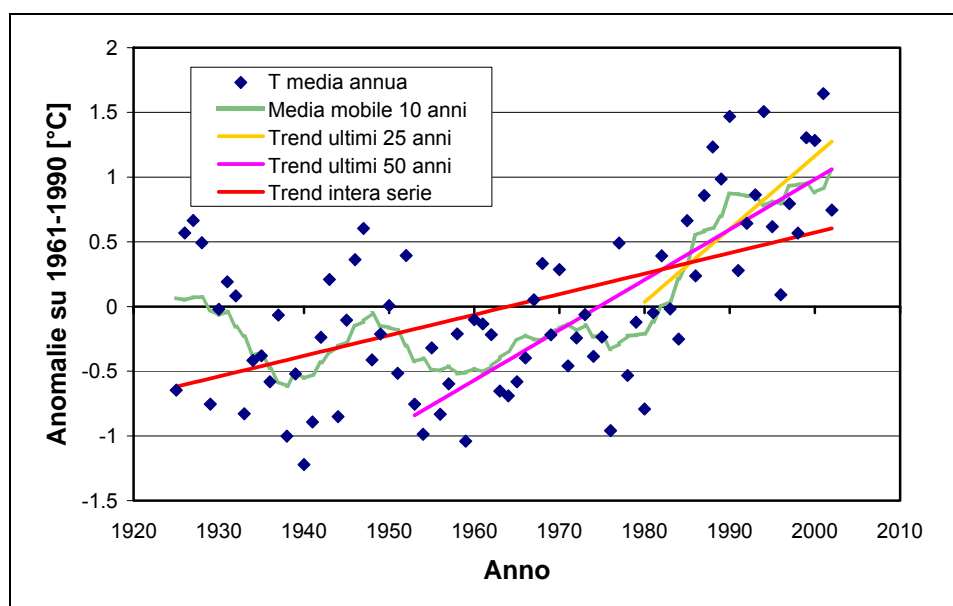


Fig. 4.18 - Anomalies des températures moyennes annuelles sur la période 1961-1990.

#### 4.5 Analyse des tendances des indices climatiques (1924-2000)

L'application du *test* de Mann-Kendall montre l'existence d'une réduction générale des précipitations, en particulier dans les afflux annuels et des mois d'hiver. À ces échelles, les températures et les précipitations montrent des tendances opposées, on peut donc imaginer dans le futur un contexte caractérisé par des températures plus élevées et par une pluviosité réduite, des phénomènes dont l'effet combiné pourrait conduire à une augmentation de l'aridité dans la région. Afin de vérifier l'existence d'un rapport entre le changement climatique constaté et l'aridité en Sicile, les indices climatiques précédemment décrits ont été calculés en utilisant les précipitations et les températures de 73 stations pour lesquelles des données pour la période 1924-2000 sont conjointement disponibles. Le *test* de Mann-Kendall a été appliqué à chacun de ces indices à l'échelle locale et régionale.

La valeur moyenne des indices au cours de la période 1924-2000 a été interpolée spatialement afin de voir sur des cartes la répartition spatiale des indices calculés. Le résultat obtenu, indiqué dans les Figures 4.19, 4.20, 4.21 et 4.22, montre que la plus grande partie de la région est caractérisée par de basses valeurs de l'indice de Lang ou Facteur Pluvial et notamment la zone sud et la zone est ; les indices de Martonne et l'indice UNEP attribuent tous à la plus grande partie de l'île un climat humide ou subhumide et un climat semi-aride uniquement le long de la côte méridionale. Enfin, la carte de l'Indice Global d'Humidité montre des résultats assez semblables à ceux du Facteur Pluvial.

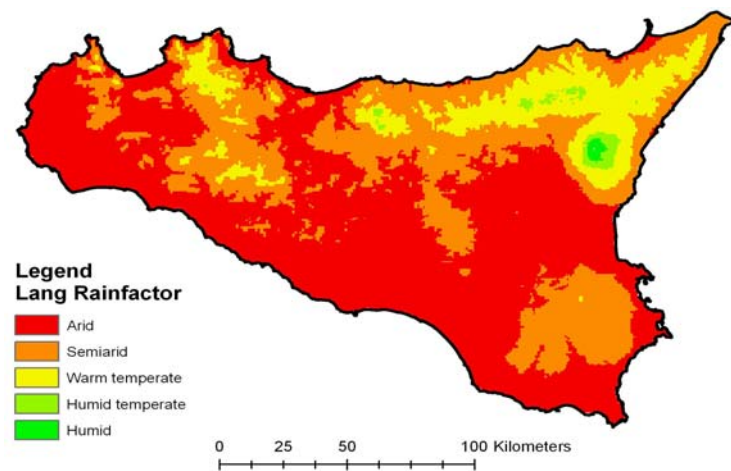


Fig. 4.19 - Répartition spatiale sur le territoire sicilien de la valeur moyenne de l'indice de Lang ou Facteur Pluvial.

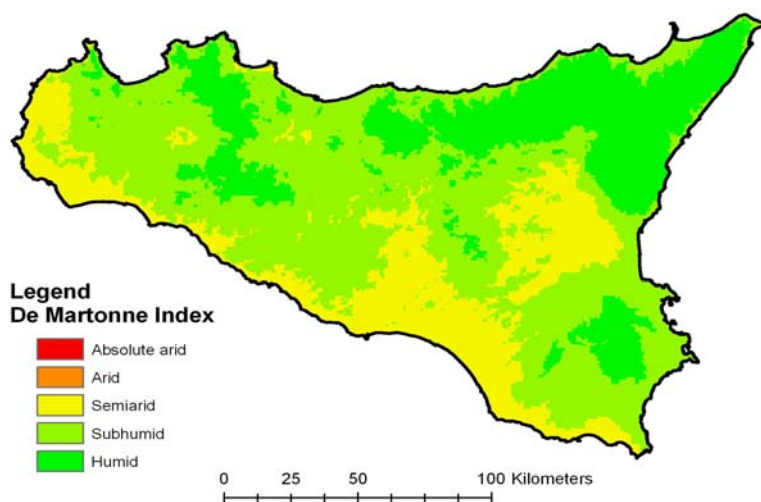


Fig. 4.20 - Répartition spatiale sur le territoire sicilien de la valeur moyenne de l'indice de De Martonne.

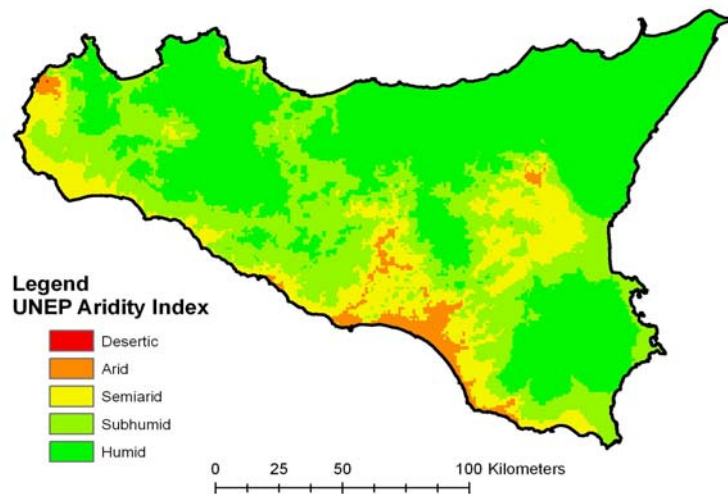


Fig. 4.21 - Répartition spatiale sur le territoire sicilien de la valeur moyenne de l'indice d'aridité UNEP.

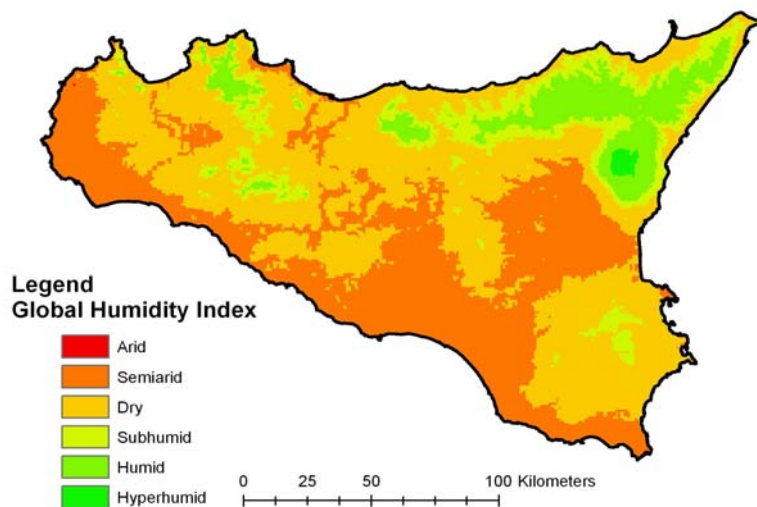


Fig. 4.22 - Répartition spatiale sur le territoire sicilien de la valeur moyenne de l'indice d'Humidité Globale.

L'application du *test* de Mann-Kendall à chacun de ces indices à l'échelle locale a noté des *tendances* qui indiquent l'existence d'une tendance négative généralisée, provoquée par les *tendances* opposées de précipitation et de température. Pour chaque niveau de confiance, ce *test* trouve à peu près le même nombre de stations à *tendance* négative pour tous les indices étudiés (Fig. 4.23).

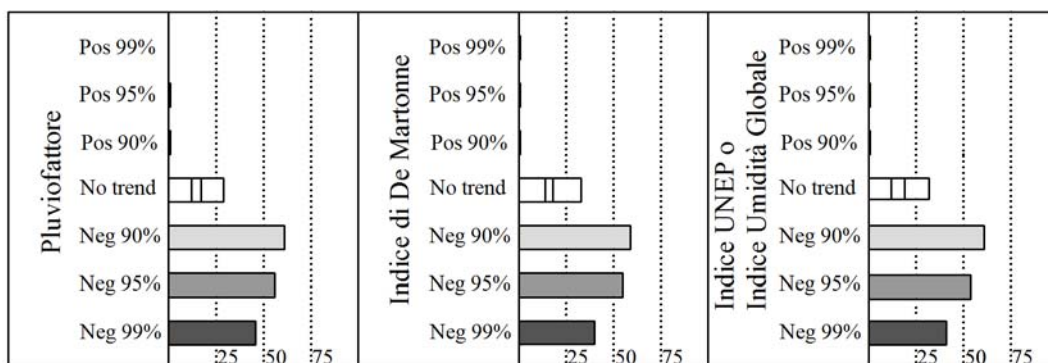


Fig. 4.23 - *Tendances* observées dans les indices climatiques aux niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

L'indice de Martonne a été aussi calculé à l'échelle mensuelle ; le plus grand nombre de *tendances* a été constaté sur les mois d'hiver, alors que les autres mois présentent un nombre limité de *tendances*. L'indice d'aridité de l'UNEP a par contre été calculé en utilisant aussi des températures et des précipitations collectées à l'échelle saisonnière. Dans ce cas, le *test* retrouve une diminution de l'indice pendant la saison hivernale et l'absence de *tendance* en été et en automne.

Les résultats de l'analyse des *tendances sur site* ont été interpolés dans l'espace afin d'identifier l'existence de zone à risque d'aridité, à savoir de zones où l'on peut prévoir une aggravation de la situation climatique. Les cartes des Figures 4.24, 4.25, 4.26 et 4.27 montrent que la région est caractérisée par la présence d'une zone étendue à *tendances* négatives à haut niveau de confiance, située en partie centrale de l'île.



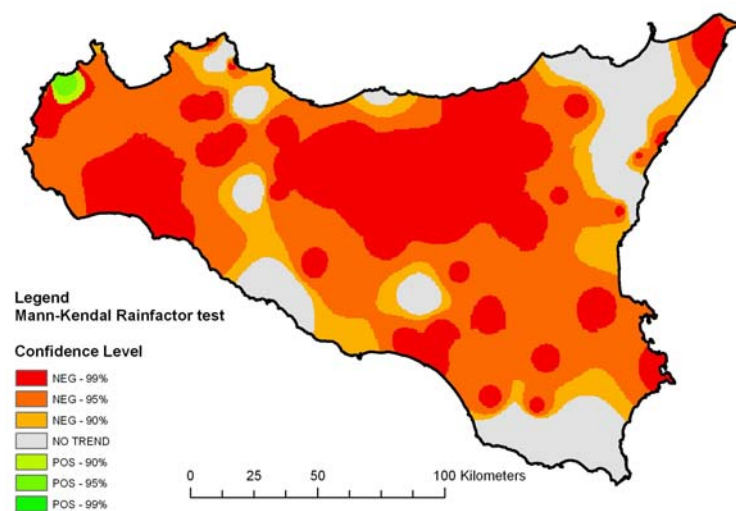


Fig. 4.24 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall dans le Facteur Pluvial.

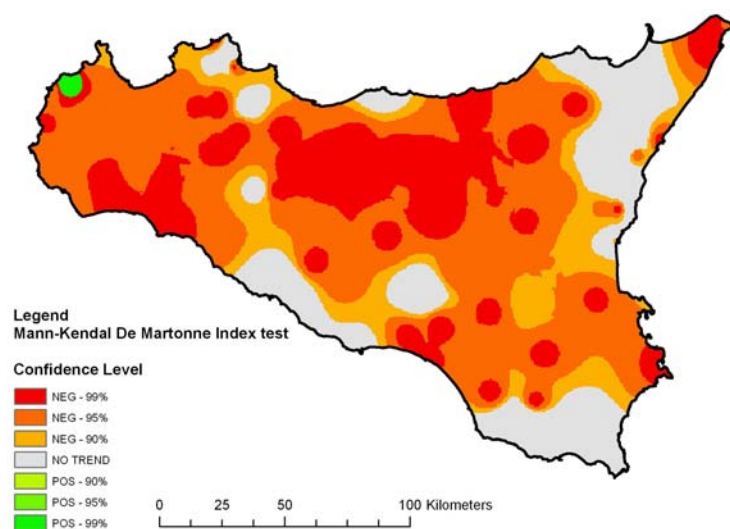


Fig. 4.25 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall dans l'indice de De Martonne.

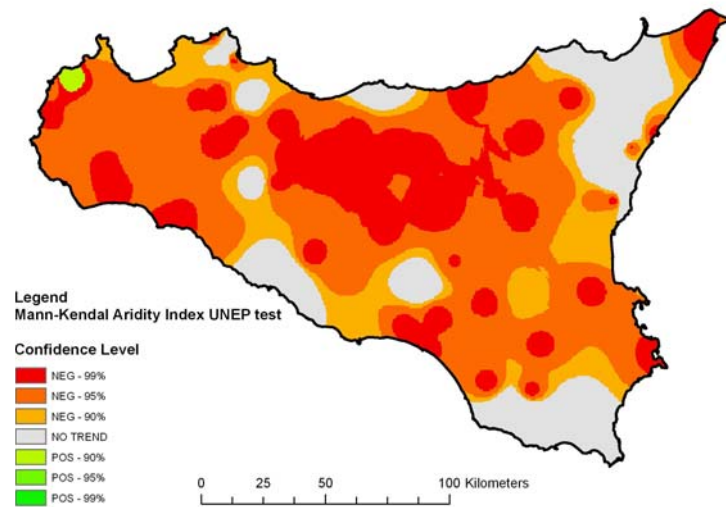


Fig. 4.26 - *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall dans l'indice de De Martonne.

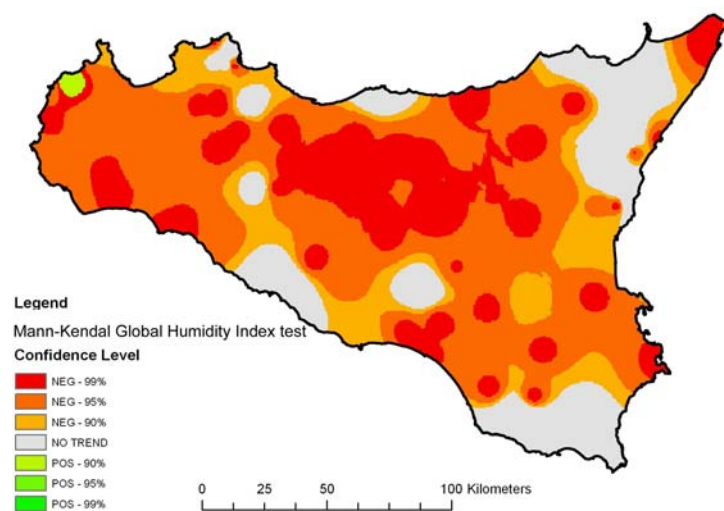


Fig. 4.27- *Tendances* relevées avec le *test* de Mann-Kendall dans l'Indice d'Humidité Globale.

Les répartitions spatiales des *tendances* du Facteur Pluvial, de l'indice de Martonne, de l'indice d'aridité UNEP et de l'Indice Global d'Humidité ont été regroupées en une seule carte qui représente le nombre d'indices, parmi ceux pris en compte, qui présentent une *tendance* en chaque point de la région. Dans cette carte de superposition (Fig. 4.28), on note l'existence d'une macro-zone concernée par des

*tendances* pour chaque index calculé. Cette zone est clairement touchée par une augmentation de l'aridité. La comparaison à la Figure 4.16 qui indique la cartographie de la *tendance* des températures met en évidence le rôle incontestablement dominant de la réduction de la pluviosité sur l'augmentation des températures. En effet, les lieux où il n'a pas été constaté de *tendance* significative des températures, à savoir toute la région centrale de l'île, présentent en tout cas une *tendance* significative de tous les indices d'aridité, imputable à la réduction de la pluviosité dans cette même zone.

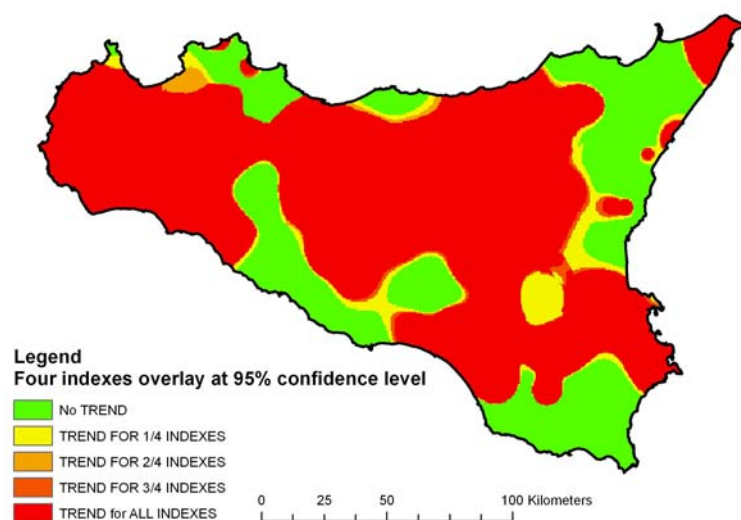


Fig. 4.28 - Carte du nombre d'indices climatiques qui présentent des *tendances* avec niveau de confiance de 95%.

Le *test* de Mann-Kendall a été appliqué à chaque indice climatique, également à l'échelle zonale et les résultats ont été comparés aux résultats obtenus par la technique d'échantillonnage *bootstrap*. Le Tableau 4.3 montre tous les résultats. Les deux *tests* permettent de déduire l'existence d'une *tendance* à l'échelle zonale pour tous les indices calculés à partir de températures et de précipitations annuelles. Quant à l'indice d'aridité UNEP à l'échelle saisonnière, les deux techniques se rejoignent tant sur la constatation de la présence d'une *tendance* en hiver que sur son absence en été et en automne, tandis qu'au printemps l'existence d'une *tendance* n'est retrouvée que par le *test* de Mann-Kendall.

	90%		95%		99%	
Indice	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>MK</sub>	T <sub>B</sub>
Pluviofattore	•	•	•	•	•	•
Indice di De Martonne	•	•	•	•	•	•
Indice UNEP annuo	•	•	•	•	•	•
Indice UNEP invernale	•	•	•	•	•	•
Indice UNEP primaverile	•		•		•	
Indice UNEP autunnale						
Indice UNEP estivo						
Indice Global d'Humidité	•	•	•	•	•	•

Tab. 4.3 - Résultats des *tests* à l'échelle régionale. Le symbole T<sub>MK</sub> indique le *test* de Mann-Kendall à l'échelle zonale, le symbole T<sub>B</sub> indique la technique *bootstrap*, le point indique l'existence de *tendance*.

#### 4.6 Observations sur les résultats

La connaissance des processus à la base des changements climatiques et la construction de modèles à l'échelle régionale et locale pour les variables météo-climatiques sont des objectifs fondamentaux à poursuivre afin qu'une projection réaliste des événements à venir et des interventions nécessaires pour lutter contre les effets de ces transformations soit possible. Dans ce contexte, l'étude des *tendances* pluviométriques devient un outil important pour une connaissance plus approfondie de l'évolution des régimes hydrologiques et donc une amélioration de la qualité des modèles prévisionnels.

Cette étude a été menée dans le but de trouver les *tendances* de précipitation, température et certains indices climatiques en Sicile tant à l'échelle locale, à savoir dans chaque station, qu'à l'échelle régionale, c'est-à-dire en considérant toutes les stations sur le territoire examiné. L'analyse réalisée a montré un changement du climat sicilien, caractérisé par une diminution globale des pluies et par une augmentation des températures moyennes annuelles.

En ce qui concerne les précipitations, les résultats obtenus montrent que les *tendances* positives sont peu fréquentes et n'ont été constatées que pour un nombre limité de stations pendant les mois d'été, alors que des *tendances* négatives significatives sont beaucoup plus courantes dans les précipitations annuelles et hivernales. De nombreuses stations à *tendances* significatives décroissantes sont

localisées dans les zones Ouest et Sud-ouest de l'île. L'absence de *tendance* est en tout cas un cas assez fréquent à toutes les échelles temporelles prises en compte.

L'analyse des températures montre que des *tendances* positives significatives sont beaucoup plus fréquentes dans les données moyennes annuelles, hivernales et estivales. La zone la plus fortement concernée par des *tendances* à niveau de confiance de 99% est située dans la partie orientale de l'île. Afin de rechercher l'effet combiné de ces *tendances* de température et de précipitation sur le climat sicilien, certains indices climatiques ont été calculés, puis le *test* de Mann-Kendall a été aussi appliqué à ces variables, à l'échelle locale et régionale. Les résultats font ressortir l'existence d'une tendance à la diminution de ces indices et cela se traduit par une augmentation de l'aridité en Sicile, en particulier dans la zone centrale et occidentale de l'île.

#### **4.7 RÉDACTION DE BILANS HYDROLOGIQUES, MÊME À L'ÉCHELLE RÉGIONALE**

L'objectif de ce point est l'analyse de modèles hydrologiques aux fins de rédaction de bilans hydrologiques, même à l'échelle régionale, pour l'évaluation des ressources en eau utilisables ; ces modèles doivent constituer la base pour les analyses d'éventuelles alternatives d'approvisionnement hydrique essentiellement à but d'irrigation.

Relativement à l'évaluation des ressources d'eau par le biais de bilans hydrologiques, il faut souligner que par le passé, la planification et la gestion de l'utilisation de ces ressources ont été mises en œuvre dans le but de répondre à la demande en eau pour tous les usages de nature anthropique, alors qu'il n'existait aucune considération quant à la capacité de la ressource à se renouveler (*Gleick*, 1996). Ainsi, sur les cinquante dernières années, l'exploitation anthropique de la ressource en eau s'est faite de plus en plus pressante, au point de provoquer l'appauvrissement des nappes aquifères et la disparition de plans d'eau, en raison d'une demande supérieure à la capacité de production. On assiste donc à une réduction progressive de l'eau disponible pour les besoins humains. La pénurie en eau

est un phénomène qui peut être imputable à de nombreuses causes dont, en premier lieu, la croissance démographique, l'urbanisation et l'industrialisation, qui ont évidemment entraîné une augmentation de la demande d'eau pour les usages civils, agricoles et industriels. À ces facteurs s'associe l'effet des éventuels changements climatiques qui se produisent depuis quelques dizaines d'années. Depuis des années, la littérature propose des études hydrologiques et climatologiques qui constatent des sensibles modifications des caractéristiques climatiques dans de nombreuses localités de la planète. Le cycle hydrologique notamment est sujet à des variations significatives dans le temps, sur une variété d'échelles temporelles et spatiales, par l'effet de multiples facteurs, parmi lesquels les causes anthropogéniques prédominent depuis quelques décennies. L'augmentation constante des gaz à effet de serre constitue, selon les affirmations de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2001), la principale cause de ce changement.

Les effets les plus évidents du changement climatique se manifestent dans les modifications du régime des précipitations, par la diminution du nombre de jours de pluie, à l'origine de l'aggravation du problème des ressources en eau, liée aussi au changement des modalités des pluies printanières et estivales ; leur intensité supérieure à la vitesse d'infiltration des sols ne permet pas un bon stockage dans les nappes ; les fluctuations piézométriques pluriannuelles des nappes ne sont pas fortement conditionnées par les transformations des régimes thermo-pluviométriques par hasard.

De récentes analyses des tendances de pluie quotidienne à l'échelle globale au cours des mois les plus chauds de l'année montrent que, sur près de 40% des terres émergées, alors que la fréquence des jours de pluie n'a pas changé de façon significative, la pluie moyenne mensuelle a augmenté pratiquement de partout de près de 5% au siècle dernier et les événements pluviométriques les plus intenses se sont accrus d'environ 20% (*Groisman et al.*, 1999). Cette augmentation des précipitations intenses estivales s'associe à une augmentation importante de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère et à un réchauffement de la basse et moyenne troposphère. Sur la Méditerranée, la diminution des précipitations à toutes les saisons

à partir de la fin des années 50 jusqu'à ce jour s'avère significative (*Piervitali et al.*, 1998). Au-delà de la quantité totale, les pluies semblent s'être modifiées dans les modalités selon lesquelles elles surviennent : dans les régions tropicales et sous-tropicales, on dénote une augmentation des jours de pluie intense et une diminution du nombre de jours de pluie. Aux latitudes moyennes et hautes, la fréquence des pluies intenses est passée de 2 à 4% (*Cacciamani et al.*, 2001). Les conséquences directes de cette évolution sont d'une part la plus forte incidence des situations de crue provoquées par des pluies importantes (point naturellement influencé non seulement par le caractère de la pluie mais aussi par la gestion du territoire), d'autre part une tendance progressive à la désertification, causée par des périodes sèches de plus en plus longues face à une plus grande consommation d'eau par la végétation, en raison de l'augmentation des températures.

En considérant la présence de significatives tendances pluviométriques décroissantes dans des zones étendues de la planète et l'augmentation de la demande en eau liée à la croissance démographique actuelle, on obtient donc un cadre mondial qui met en évidence une situation de diminution progressive des ressources en eau. Par ailleurs, il ne faut pas sous-estimer le fait que l'eau, de surface et souterraine, comme la population n'ont pas une répartition uniforme sur le territoire mondial, ce qui fait que de nombreuses zones de la planète sont déjà touchées par une grave carence en eau douce. Dans de nombreuses zones, on assiste en revanche à une surexploitation de l'eau, les prélèvements dépassant largement la capacité d'apport des cours d'eau et des pluies ainsi que le pouvoir de régénération des réserves souterraines ; chaque variation climatique se reflète donc sur la disponibilité d'eau et rend problématique la possibilité de prélèvements. Par ailleurs, les eaux de surface comme les eaux souterraines sont souvent sujettes à des phénomènes de pollution qui en compromettent l'utilisation.

La nécessité de pouvoir prévoir les scénarii climatiques de demain et d'en déterminer les impacts correspondants sur les ressources naturelles, et en premier lieu sur la ressource en eau, s'est concrétisée par la réalisation de modèles de circulation atmosphérique globale (GMC) ; ces modèles ont été initialement développés pour la

simulation de la circulation atmosphérique par l'effet de conditions externes forçantes déterminées. Ils ont été ensuite utilisés pour évaluer la réponse climatique à l'augmentation progressive de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et donc pour effectuer une estimation du futur changement climatique. Les modèles GMC ne permettent cependant pas de répondre aux interrogations sur la variabilité hydrologique à l'échelle régionale, la précision de ces modèles diminuant en considérant des échelles spatiales et temporelles peu étendues (Xu, 1999).

La connaissance réelle de la disponibilité et de la qualité des prélèvements effectués de ressources d'eau constituent des critères indispensables pour une gestion durable de la ressource. Dans ce but, de nombreuses études ont été menées ces dernières années pour évaluer, dans des zones très étendues, les conditions de pénurie en eau liées à l'exploitation anthropique et au changement climatique, qui constitue la principale cause d'altération dans le temps et dans l'entité des débits (Guo *et al.*, 2002).

La nécessité de simuler les phénomènes hydrologiques sur des zones très étendues vient de l'exigence d'estimer la variabilité de la ressource en eau et d'évaluer les effets du changement climatique sur un vaste domaine géographique. La variété des processus hydrologiques ne permet pas, en effet, d'étendre à grande échelle un modèle appliqué aux petites échelles. L'approche la plus fréquente prévoit la définition de scénarii futurs en utilisant des modèles hydrologiques à macro-échelle, car la gestion de la ressource en eau requiert la connaissance de la variabilité des processus hydrologiques sur des zones étendues (Arnell, 1999). L'utilisation de modèles à macro-échelle présente de nombreux avantages par rapport à l'utilisation de modèles à l'échelle de bassin ; tout d'abord, ces modèles peuvent être appliqués à des zones très étendues, sans nécessité de calibrage, comme dans le cas des modèles à l'échelle de bassin ; par ailleurs, par rapport à ces derniers, le nombre de paramètres qu'ils nécessitent est inférieur. Ces modèles étant utilisés pour prévoir les variations auxquelles sera sujette la ressource en eau dans le futur, ils doivent être basés sur la représentation physique des processus hydrologiques impliqués dans la transformation des précipitations en évaporation et en débit (Arnell, 1999).



Un modèle à macro-échelle se base sur le bilan hydrologique calculé sur chaque cellule d'un réseau, division du territoire examiné ; le modèle suppose que certains paramètres en entrée soient constants dans chaque cellule, alors que d'autres, comme la capacité de stockage du terrain, varient dans chaque cellule selon une répartition statistique. Les paramètres du modèle doivent être obtenus quantitativement à partir des données spatiales relatives aux grandeurs considérées ; la qualité des résultats fournis par des modèles de ce type est donc étroitement liée à la qualité et aux caractéristiques des données en entrée.

Au cours des dernières années, de nombreux modèles ont été développés pour l'étude de la variabilité des phénomènes hydrologiques sur des domaines géographiques étendus. Parmi ces modèles, le premier (*Vörösmarty et al.*, 1991) se base sur un bilan hydrologique mensuel évalué sur une grille à cellules de dimension affectée ; pour chacune de ces cellules les paramètres du modèle dérivent de grandeurs relatives aux caractéristiques du terrain et de la végétation. Il s'agit d'un modèle de type *lumped*, à savoir un modèle à paramètres concentrés, caractérisé par l'invariabilité spatiale des paramètres physiques utilisés. Par la suite, des modèles analogues au précédent ont été développés, mais avec une sensible différence ; le modèle VIC (*Variable Infiltration Capacity*) considère par exemple les caractéristiques du sol variables à l'intérieur des cellules d'un réseau selon une répartition de probabilité (*Abdulla et Lettenmaier*, 1997).

Le macro-PDM (*Probability Distributed Model*) est un modèle très proche du VIC, car il attribue aux caractéristiques du sol une variabilité statistique (*Arnell*, 1999) ; ce modèle, basé sur un bilan hydrologique mensuel, tient compte des composantes suivantes : la précipitation qui se veut répartie uniformément à l'intérieur d'une cellule ; l'écoulement direct, généré par la pluie en excès par rapport à la pluie nécessaire à la saturation du sol, qui alimente le flux des cours d'eau ; l'évaporation, distinguée en potentiel et en pluie réelle, l'interception des pluies par la végétation ; l'évaporation par les lacs, les marais et les zones humides. L'application d'un modèle de ce type requiert la connaissance des propriétés du sol et de la couverture végétale dans la zone étudiée, actuellement obtenues par l'utilisation de techniques de

télédétection. L'écoulement total dans chaque cellule est fourni par la somme de plusieurs termes comprenant les pertes liées à l'évaporation et à l'infiltration.

L'HRM (*Hydrological Recursive Model*) est un modèle caractérisé par quatre paramètres, qui simule l'écoulement en utilisant comme données en entrée la précipitation et l'évapotranspiration ; cette méthode est applicable à moyenne et grande échelle (Droque *et al.*, 2004).

En général, l'application d'un modèle à macro-échelle permet de simuler et de prédire les possibles variations subies par les processus hydrologiques par effet du changement climatique, ce qui est possible par la définition de différents scénarii futurs, obtenus en supposant des variations dans les grandeurs en entrée. Les scénarii ainsi définis peuvent tenir compte des effets produits par la combinaison de plusieurs facteurs, comme l'incrément de la température, qui détermine des variations dans le phénomène de l'évaporation, ou la réduction des afflux.

L'approche utilisée dans les modèles hydrologiques à macro-échelle associée à des estimations sur la demande en eau et la disponibilité d'eaux de surface et souterraines peut devenir un outil intéressant pour l'estimation des conditions de pénurie d'eau dans des zones étendues (Meigh *et al.*, 1999). La connaissance quantitative de ces éléments permet de définir certains indices qui résultent d'une comparaison entre la demande et la ressource disponible. Dans l'application du modèle à macro-échelle, des « sous-modèles » peuvent être utilisés pour la détermination des termes qui apparaissent dans l'équation du bilan hydrologique, par exemple pour estimer les pertes dues à l'interception des pluies dans les zones recouvertes de forêts ou dues à l'infiltration dans les masses d'eau souterraines (Meigh *et al.*, 1999).

La demande en eau est évaluée à partir des projections démographiques, des informations relatives aux activités d'élevage et à l'usage d'irrigation et industriel, si disponibles ; quand on ne dispose pas de ces informations, les estimations obtenues par application de modèles opportuns peuvent être utilisées. L'examen de la répartition spatiale de la demande est un aspect important pour localiser les zones où celle-ci prend des valeurs plus élevées (en général, les villes et les zones cultivées).

Concernant la disponibilité de la ressource en eau souterraine, celle-ci peut être estimée par le biais de modèles hydrologiques basés sur l'analyse de cartes hydrogéologiques. Notamment, après avoir localisé les masses d'eau souterraines utilisées pour le prélèvement d'eau, il faut en estimer les délais de réapprovisionnement et surtout la quantité d'eau potentiellement prélevable ; il est nécessaire, dans ce cas aussi, de recourir à l'utilisation de *sous*-modèles qui fournissent des estimations suffisamment fiables des grandeurs recherchées. Une fois le modèle à macro-échelle appliqué pour simuler la variation de processus hydrologiques, et une fois la demande et les disponibilités d'eaux souterraines dans la zone d'intérêt estimées, il est procédé à la définition des futurs scénarii possibles, par le calcul d'indices pour chaque cellule du réseau. Un modèle de ce type permet de trouver des situations de pénurie en eau dans les conditions actuelles ou dans les scénarii futurs obtenus en considérant la combinaison de plusieurs facteurs, comme l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, la croissance démographique, les changements dans la répartition de la population et l'incrément de la demande en eau lié à l'amélioration de la qualité de vie (*Meigh et al.*, 1999).

Dans le cadre de cette convention, il a été décidé de mettre au point un modèle de bilan à l'échelle régionale et moyenne annuelle qui se révèle un outil capable de restituer l'écoulement et surtout le débit que traverse une section déterminée d'un cours d'eau ; disposer d'un tel outil est d'une importance capitale tant pour la planification des ressources en eau dans la région de la Sicile que pour la mise en évidence des éventuelles zones menacées de désertification. À partir de la collection bibliographique précédemment évoquée, dans les modèles à macro-échelle, il a été choisi d'utiliser les modèles à carte d'écoulement (*Arnell*, 1995, 1999).

Les modèles à cartes d'écoulement représentent un outil précieux permettant d'estimer les écoulements dans une région donnée. Ces cartes peuvent également être utilisées pour l'estimation des pertes hydrologiques par différence entre les informations sur la précipitation et sur l'écoulement moyen annuel. En littérature scientifique, la plupart des cartes ont été réalisées à des échelles différentes, de l'échelle de bassin à l'échelle continentale (*Liebscher*, 1972; *Bishop e Church*, 1992,

1995; *Sauquet et al.*, 2000) ; presque toutes se basent sur une représentation à isolignes. Ces cartes s'avèrent adaptées pour décrire la variabilité spatiale d'une grandeur continue dans l'espace, comme la précipitation, tandis qu'elles se révèlent moins adaptées pour décrire l'écoulement de l'eau. Pour ce type de variable, les cartes choroplèthes, obtenues en reportant les données sur une grille régulière, apparaissent plus adaptées (*Arnell*, 1995). La carte choroplèthe est un système de représentation cartographique utilisé pour illustrer la répartition spatiale d'un phénomène, utilisant des couleurs de distinction appliquées à des zones différentes ; le degré d'intensité exprime la variation du phénomène sur les unités territoriales choisies. On a donc essayé de réaliser des cartes réparties spatialement relatives à l'écoulement moyen annuel à l'échelle régionale sicilienne en utilisant les techniques GIS.

La première phase de ce travail a été la recherche des données ; l'examen a porté sur les données mensuelles et annuelles d'apport et d'écoulement que contiennent les annales hydrologiques fournies par l'Observatoire de Eaux de Sicile de 1923 à 1997. Afin de garantir une plus grande fiabilité aux analyses suivantes, les stations à quantité d'échantillon inférieure à dix ans ont été éliminées, puis il a été vérifié si, dans le temps, sont survenus des événements ayant pu altérer la série historique de la même station en ramenant donc l'information hydrographique initialement disponible de 105 stations à 69. Par le biais de techniques GIS, on a trouvé les bassins hydrographiques à partir du DEM de la Sicile (Fig. 4.29).

Une fois terminée la phase de *screening* des données, l'étape suivante a été l'identification des zones homogènes, en se basant sur le concept de similitude hydrologique selon lequel les bassins à caractéristiques géomorphoclimatiques identiques devraient avoir des comportements analogues du point de vue hydrologique. Pour la détermination des régions hydrométriques homogènes, on a calculé les statistiques récapitulatives des données, calculé les valeurs des rapports entre les L-moments ( $L_{cv}$ ,  $L_{skew}$ ,  $L_{kur}$ ) exprimées en tant que combinaison linéaire des moments lourds en probabilités (*Hosking et Wallis*, 1997) et l'utilisation de deux *tests* : le *test* de discordance, qui permet d'identifier les stations qui présentent des valeurs des susdits rapports significativement différentes de celles des autres stations

et le *test* d'hétérogénéité, qui vérifie si un groupe de stations peut être considéré ou non comme appartenant à une région homogène. La Figure 4.30 montre la division de la Sicile en six sous-zones hydrométriques homogènes, obtenue en appliquant les *tests* basés sur les *L-moments*.

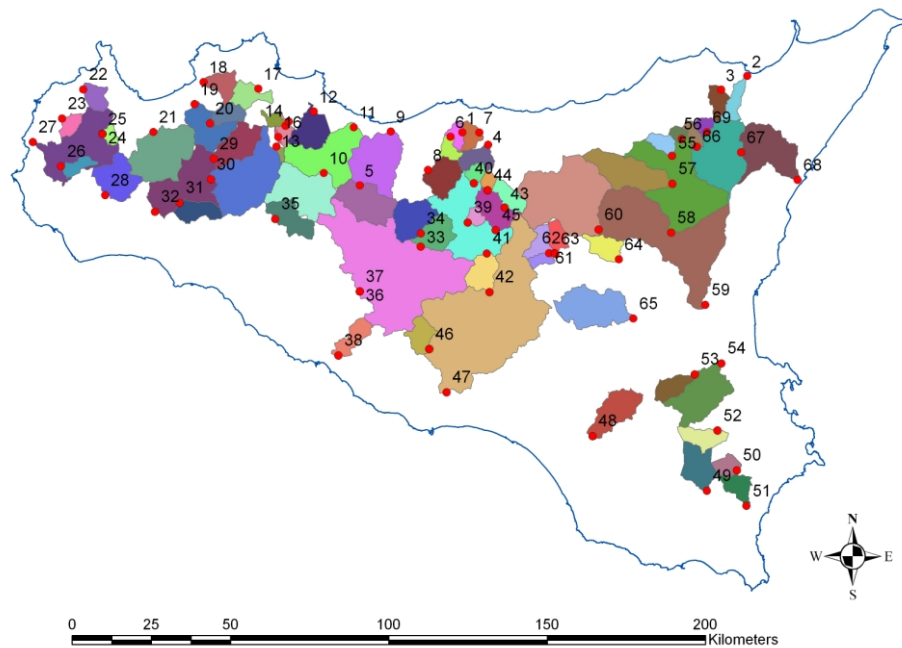


Fig. 4.29 - Situation et délimitation des bassins hydrographiques.



Fig. 4.30 - Division de la Sicile en 6 sous-zones hydrométriques homogènes.

Pour la réalisation du modèle de transformation afflux-écoulements applicable à chaque sous-zone homogène de division de la Sicile, il a fallu traiter une quantité importante de données, à l'aide du logiciel ArcGIS. Il a été effectué une analyse critique sur les bassins contenant les 44 « grands barrages » du territoire sicilien, car la réalisation d'une retenue artificielle provoque, au-delà de la variation du régime hydrique et fluvial sur la superficie du bassin versant directement sous-jacent, l'arrêt de l'écoulement qui est stoppé par le barrage et n'arrive donc plus par le réseau fluvial à la section de mesure où peut se trouver la station hydrométrique.

Afin d'estimer l'écoulement aussi dans les bassins non équipés, on a essayé de mettre en œuvre un modèle simple de transformation afflux-écoulements à l'échelle annuelle. La méthode présentée ci-après fournit une courbe de « prévision » de l'écoulement annuel en fonction de l'afflux estimé sur la même fenêtre temporelle. Il a été analysé la configuration particulière morphologique et géographique des bassins car dans certains cas, le long du même cours d'eau et donc à l'intérieur du même bassin hydrographique, il existe plus d'une station hydrométrique pour des bassins différents. Dans ces cas, l'information hydrologique contenue dans le bassin soutenu par la station en aval comprend l'information contenue dans les bassins en amont et il est donc nécessaire de rendre les informations hydrologiques de chaque sous-bassin indépendantes des autres en excluant ainsi des informations redondantes. À titre d'exemple, la figure 4.32 indique les unités territoriales identifiées pour le bassin du Belice. Pour chacune de ces unités indépendantes, il a été calculé les hauteurs moyennes annuelles d'afflux et d'écoulement et elles ont été disposées dans le diagramme illustré en Figure 4.32. Le diagramme réalisé, on a recherché la fonction qui représente au mieux la relation entre afflux et écoulements. La fonction adoptée afin de minimiser les écarts est fournie par l'ensemble de deux équations qui, en fonction d'un paramètre discrétisant (apport critique,  $A_c$ ), tendent à représenter au mieux la relation recherchée. Le choix des deux différentes équations est lié à la non linéarité des processus hydrologiques, surtout dans le cas de faibles afflux ; il est donc préférable d'utiliser la fonction exponentielle dans les cas où la pluie s'avère inférieure à une valeur critique  $A_c$ , alors qu'on utilise la fonction linéaire pour des

valeurs de précipitations supérieures à  $A_c$ . Le modèle afflux-écoulements est décrit par les formules suivantes qui minimisent la somme des carrés des erreurs entre écoulements mesurés et estimés.

$$D = 0.10725 \cdot A \cdot e^{(0.00123 \cdot A)} \quad \text{pour } A < A_c \quad [4.b]$$

$$D = 0.65342 \cdot A - 296.38 \quad \text{pour } A \geq A_c \quad [4.c]$$

où  $D$  est l'écoulement moyen annuel [ $\text{mm annuel}^{-1}$ ] et  $A$  est l'afflux moyen annuel [ $\text{mm annuel}^{-1}$ ].

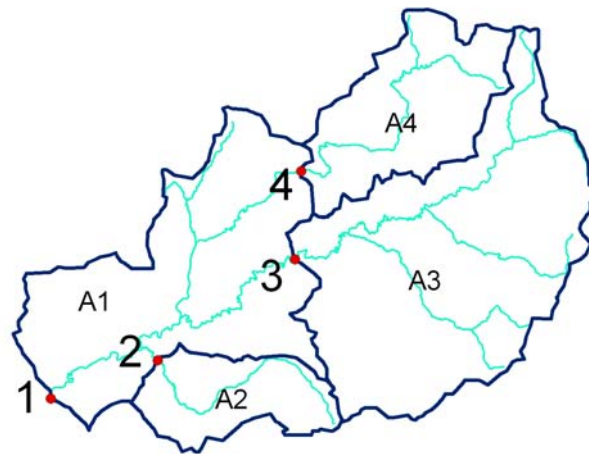


Fig. 4.31 - Sous-bassins du Belice.

La procédure présentée jusqu'ici n'est pas appliquée à l'échelle de bassin mais à l'échelle des six zones hydrologiquement homogènes précédemment identifiées. Le fait que les données relatives aux bassins de dimensions de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés suivent la même relation et donc la même tendance, témoigne que le phénomène observé s'avère peu dépendant de la dimension du bassin, aboutissant donc à la conclusion que le comportement de la courbe de l'écoulement attendu est typiquement à échelle invariante, ce qui représente un résultat de grand intérêt.

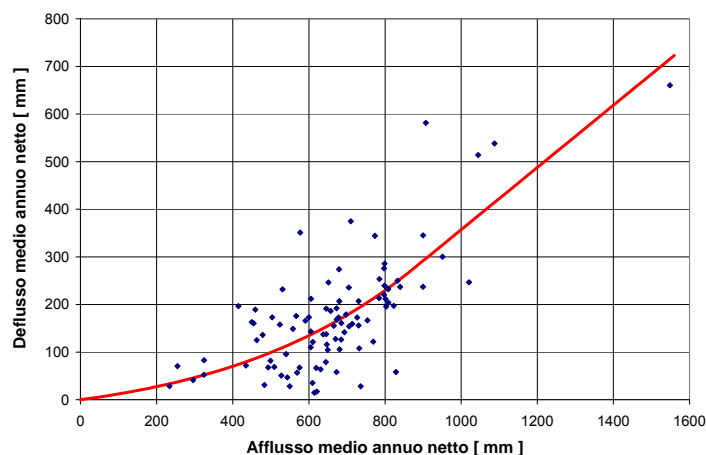


Fig. 4.32 - Rapport afflux nets-écoulements nets relatifs au bassin du Belice.

Les rapports obtenus, utilisés pour estimer l'écoulement de surface dans chacune des six sous-zones homogènes, sont appliqués, par des techniques GIS, à l'échelle régionale, à l'aide d'une structure de type *raster*, en réalisant, comme produit ultime, des cartes réparties spatialement relatives à l'écoulement moyen annuel. À partir notamment de la couche informative des précipitations moyennes annuelles (Fig. 4.33), d'une résolution de cellule de 500 m, il a été créé, en appliquant le modèle afflux-écoulements décrits en [4.b] et [4.c] la couche informative de l'écoulement moyen annuel « attendu » (Fig. 4.34).

Une fois la couche informative relative à l'écoulement moyen « attendu » réalisée, on observe que celle-ci, pour les bassins équipés, ne fournit pas de valeurs égales aux valeurs moyennes annuelles avec lesquelles le modèle a été créé ; ceci vient du fait que les rapports utilisés pour la détermination de l'écoulement estiment le comportement moyen des bassins de chacune des six sous-zones, et ces estimations s'éloignent d'une quantité plus moins variable du comportement de chaque sous-bassin. À titre d'exemple, le Tableau 4.4 illustre, pour les sous-bassins du Belice, les valeurs de l'afflux moyen annuel  $\bar{A}$  et de l'écoulement moyen annuel  $\bar{D}$ , tous deux relatifs aux unités territoriales  $A_i$  ; il indique enfin la valeur de l'écoulement moyen



estimé  $\overline{D^*}$  comme moyenne zonale de la *couche* de l'écoulement moyen annuel « attendu ».

Sottobacini del Belice				
Valori medi dei sottobacini	Belice destro a Sparacia [mm]	Belice sinistro a Casa Balate [mm]	Senore a Finocchiarà [mm]	Belice a Belice [mm]
$\bar{A}$	702.78	692.19	661.67	583.60
$\bar{D}$	219.86	192.25	147.97	128.44
$\bar{D^*}$	181.12	176.99	159.98	117.76

Tab. 4.4 - Valeurs d'afflux et d'écoulement moyennes nettes pour les sous-bassins du Belice.

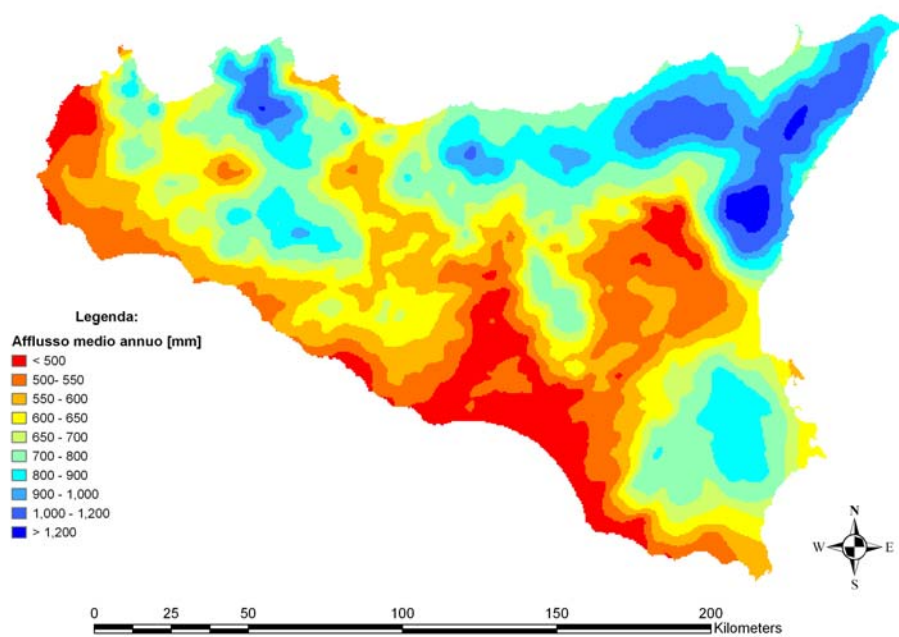


Fig. 4.33 - Couche informative des précipitations moyennes annuelles.

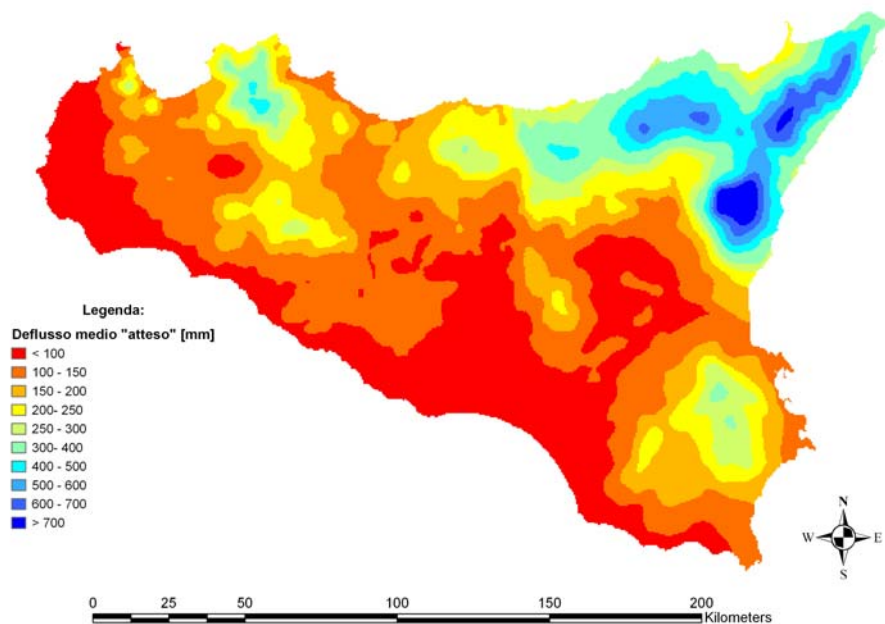


Fig. 4.34 - Couche informative de l'écoulement moyen « attendu ».

La couche informative « corrective » indiquée en Figure 4.35 est une couche dans laquelle aux différents bassins équipés est attribuée la valeur correspondante de l'écoulement nécessaire pour faire coïncider la valeur de l'écoulement moyen, estimé sur la carte dans une section de fermeture d'un bassin équipé, avec la valeur mesurée par la station hydrométrique correspondante.

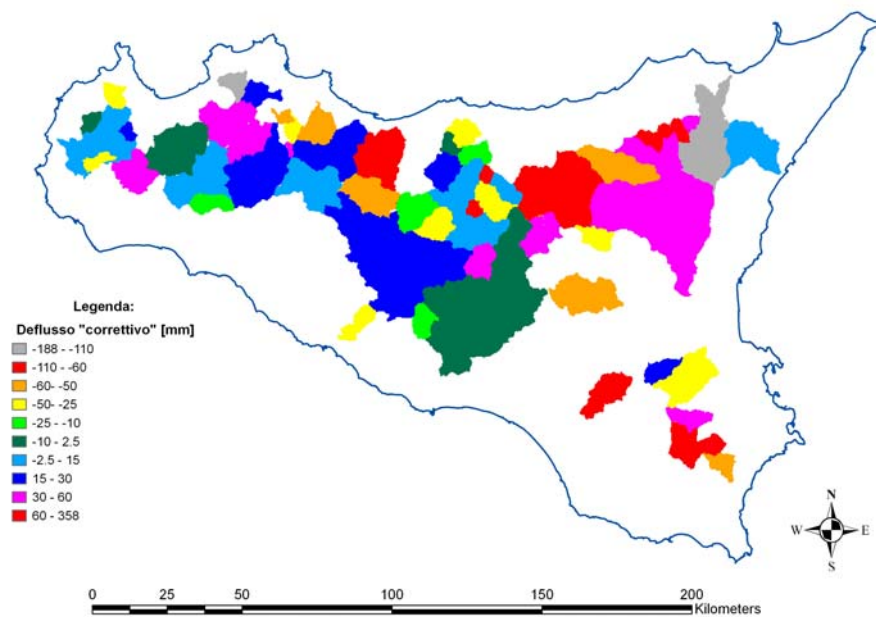


Fig. 4.35 - Couche informative de l'écoulement annuel « corrective ».

Cette couche est ensuite additionnée à la couche informative de l'écoulement attendu, donnant ainsi la couche informative de l'écoulement « réel » (Fig. 4.36) qui exprime pour chaque cellule, d'une dimension caractéristique de 500 m, la valeur de l'écoulement spécifique, à savoir l'écoulement généré dans cette cellule.

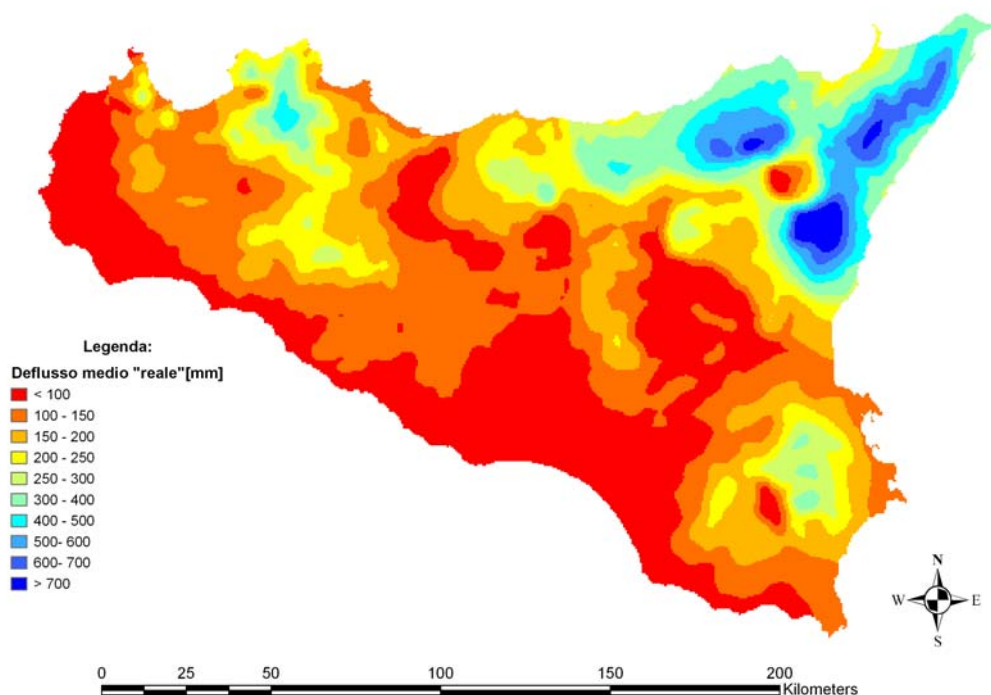


Fig. 4.36 - Couche informative de l'écoulement annuel moyen « réel ».

Le dernier objectif de ce travail est la création d'une couche informative exprimant dans chaque cellule l'écoulement produit par toutes les zones contributantes qui se déversent en ce point, à savoir l'écoulement cumulé. La couche informative des écoulements cumulés a été obtenue en utilisant l'algorithme *Weighted Flow-Accumulation* dans *ArcMap*. L'algorithme en entrée utilise la couche informative *Flow Direction*, et restitue un *raster* dans lequel chaque cellule prend la valeur cumulée des *pixels*, de la couche informative utilisée comme *raster* des poids, qui se déversent en ce point. Puisque le *raster* des poids utilisé est celui qui se rapporte à l'écoulement moyen « réel » en termes de hauteur d'écoulement, chaque cellule du *raster* en sortie est caractérisée par la valeur de l'écoulement cumulé spécifique [mm/an] rapporté à l'unité de cellule (100 m x 100 m). La Figure 4.37 illustre la couche informative des débits moyens annuels pour des débits supérieurs à 100 l/s.

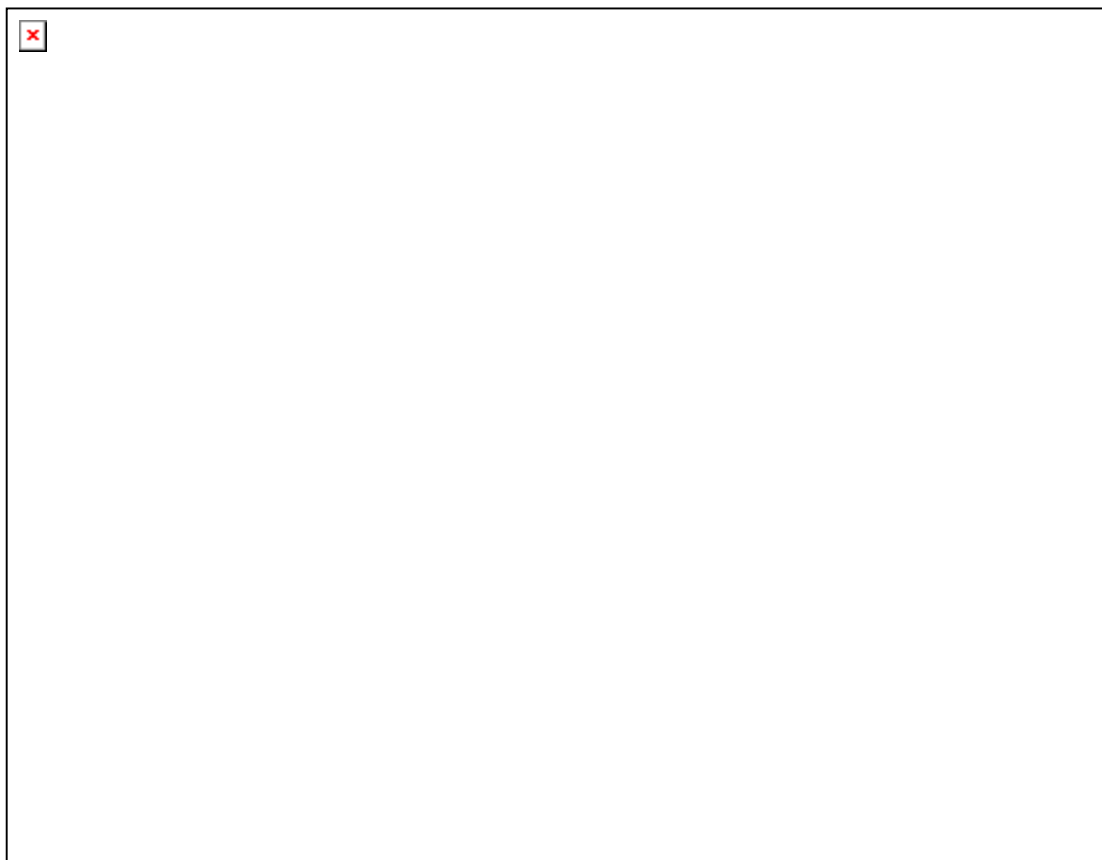


Figure 4.37 - Débits moyens annuels (l/s) avec valeur de seuil définie à 100 l/s.

Ce type de cartographie a donné de bons résultats et représente un excellent point de départ dans de nombreux autres domaines tel que celui de la détermination des pertes hydrologiques, avec une attention particulière pour le phénomène actuel et répandu de la désertification ; il constitue par ailleurs un parfait outil d'aide à la rédaction du Plan de Protection des Eaux prévu par le Décret législatif 152/99 car il permet d'estimer la concentration des polluants à partir de la connaissance des charges correspondantes.

## ***Chapitre 5 - Lignes directrices d'identification de mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification et réalisation d'une intervention de présentation de prévention et de mitigation***

***Pr Giuseppe Rossi***

***Département de Génie Civil et Environnemental - DICA, Université des Études de Catane***

Toujours dans le cadre de la manifestation de phénomènes de désertification au sein du territoire régional, des nouvelles actualisées ont été données par le Plan d'Action Local sur la lutte contre la désertification en Sicile, mis en œuvre par l'Observatoire des Eaux de la Région Sicile dans le cadre de l'Accord de Programme 2005 entre le Ministère de l'Environnement et de la Sauvegarde du Territoire, le CNLSD et l'Université des Études de Calabre. Cette étude qui porte sur l'identification et l'analyse d'une zone d'intervention particulièrement exposée à la sécheresse et à la désertification, a été menée sur deux zones différentes:

- La partie des vallées du bassin de l'Imera méridional, correspondant principalement au territoire de la Commune de Licata (dirigée par le Département de Génie Civil et Environnemental de l'Université des Études de Catane, 2007);
- La zone côtière de la Sicile occidentale entre Trapani et Mazara del Vallo (dirigée par le Département de Génie Hydraulique et Applications Environnementales de l'Université des Études de Palerme, 2007).

L'analyse des deux études a montré que dans les deux zones analysées, les phénomènes de salinisation du sol ont pris une particulière importance, se caractérisant comme cause principale des processus de désertification en cours. Notamment dans la zone de Licata, la sérieuse pénurie en eau et la conséquente utilisation généralisée d'eaux saumâtres naturelles pour l'irrigation conduit inévitablement à des phénomènes de salinisation et à l'altération des processus de

formation de la matière organique. De plus, dans le territoire de la plaine entre Marsala et l'embouchure du Modione, la zone identifiée comme zone vulnérable aux processus de salinisation correspondrait aux parties irriguées du secteur, indiquant que, dans ce cas aussi, la dangerosité des processus de salinisation en cours serait étroitement liée à la qualité peu adaptée des eaux utilisées pour l'irrigation.

Une fois terminée la phase de collecte de la documentation existante sur les sujets de la désertification en Sicile, la phase d'identification et de délimitation des zones à risque a été mise en œuvre par comparaison détaillée des zones du territoire régional apparues comme les plus vulnérables aux susdits phénomènes. À partir de l'analyse réalisée, d'un commun accord avec les autres institutions technico-scientifiques de ce projet, le choix de la zone d'étude identifiée par la zone agricole de la plaine de Licata a été effectué.

## **5.1 VULNÉRABILITÉ À LA SÈCHERESSE ET À LA DÉSERTIFICATION DANS LA ZONE D'EXAMEN**

Afin d'identifier les domaines sur lesquels intervenir avec des actions ciblées, il a été procédé à une analyse des caractéristiques de la zone objet de cette recherche en termes de vulnérabilité aux phénomènes de sécheresse et de désertification. Il est notamment ressorti que dans la campagne de Licata, il existe divers facteurs prédisposant à la sécheresse et à la désertification qui s'avèrent liés tant à des causes naturelles qu'anthropiques.

Du point de vue naturel, la prédisposition de la zone à ces phénomènes doit être recherchée dans sa lithologie constituée de sédiments argileux et d'évaporation à basse perméabilité permettant une très basse infiltration et, donc, un faible réapprovisionnement des nappes aquifères. Cette composition naturelle du terrain le

rend en fait peu résistant à l'érosion et en favorise la perte de la couche de sol fertile. Les causes naturelles comprennent aussi les problèmes de carence qualitative et quantitative des ressources en eau.

Concernant l'aspect quantitatif, la zone de Licata se situe dans un cadre climatique plus vaste de type subhumide sec à faibles précipitations qui s'élèvent à près de 430 mm de moyenne annuelle (période de référence 1925-2003) avec une certaine variabilité interannuelle (coefficient de variation des précipitations annuelles  $c_v$  de 0.3) qui, entre autres, apparaît plus marquée au cours des trente dernières années étudiées par rapport à la même période précédente. Une analyse effectuée sur les précipitations enregistrées à la station de Licata dans la période d'observation ci-dessus a montré que sur seulement 11% environ de la période de référence, il a été noté une précipitation à valeurs supérieures à 550 mm annuels, alors que dans 89% des cas des valeurs inférieures ont été enregistrées. À la faible pluviosité de la zone s'associe de plus le caractère souvent torrentiel des événements qui, au-delà d'endommager les cultures locales, tend à générer des zones à forte érosion.

Relativement aux faibles précipitations de la zone étudiée, afin d'évaluer dans quelles mesures celle-ci s'avère touchée par des conditions de sécheresse, au cours de la présente recherche il a été calculé l'indice SPI (*Standardized Precipitation Index*) pour la station de Licata. Cet indice, développé par McKee et al. (1933), permet de quantifier le *déficit* de précipitation pour diverses échelles temporelles afin d'estimer les impacts de la sécheresse sur les différentes ressources en eau. En effet, sur des échelles temporelles courtes, de l'ordre de 1 à 6 mois, l'humidité du sol pâtit principalement des anomalies de précipitation avec des conséquences immédiates sur le plan agricole; au contraire, sur des échelles plus longues (de 6 à 48 mois), le déficit de pluie influence davantage les écoulements superficiels et souterrains et les retenues. À partir des précipitations mensuelles enregistrées à Licata sur la période



1928-2003, il a donc été calculé l'indice SPI pour les échelles temporelles  $k$  égales à 1, 3, 6, 12, 24 et 36 mois. L'analyse effectuée et les résultats illustrés en figure 5.1 permettent de déduire que les périodes de sécheresse (couleurs du jaune au rouge) apparaissent assurément plus fréquentes et plus durables par rapport aux périodes humides (couleurs bleu ciel à bleu). On peut constater en effet, la façon seulement sporadique dont se présentent des périodes humides pour toutes les échelles d'agrégation considérées, alors qu'en général la condition quasi normale nettement prédominante semble celle de sécheresse (avec SPI de -1 à 1). Relativement aux trente dernières années d'analyse, il faut noter la façon dont les plus hautes échelles d'agrégation mettent en évidence une sorte d'accentuation des conditions de sécheresse. À partir de la fin des années Soixante-dix, à l'exception de quelques années autour de 1997, on constate de façon évidente une accentuation de la sécheresse avec des valeurs de SPI inférieures à 1.5.

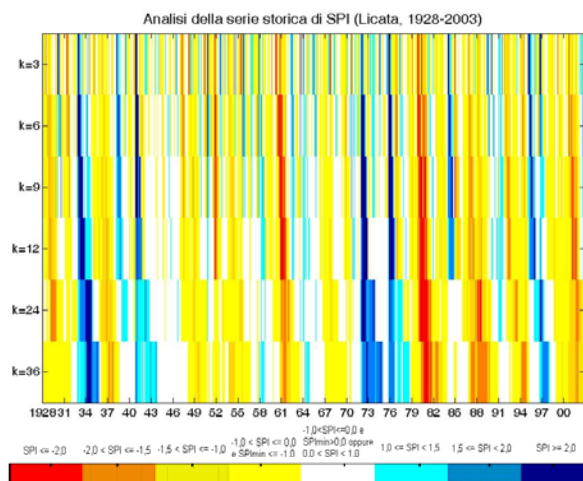


Fig. 5.1 - Indice SPI pour la station de Licata (1928-2003).

La quantité des ressources en eau ne représente cependant pas le seul élément susceptible d'influencer leur disponibilité, puisque l'état qualitatif des ressources conditionne lui aussi les possibilités d'utilisation. Dans le cas de la zone objet d'étude,

la qualité des eaux de surface s'avère compromise par la présence d'affleurements de type sulfo-gypseux naturellement présents dans le sol du bassin du fleuve Imera méridional qui, dans son cours terminal, touche aussi la campagne de Licata. Ce groupe lithologique altère la qualité des ressources en eau par contact de l'eau de pluie avec la roche affleurante, leur conférant un taux élevé de salinité qui augmente en approchant de l'embouchure du fleuve. L'excessif enrichissement en sels des eaux qui touchent le territoire de la plaine de Licata les rend parfois inadaptées à l'irrigation, leur utilisation provoquant une accumulation de sels dans des sols non salins à l'origine et en accélère les processus de désertification. Au-delà de faire augmenter les valeurs de conductivité électrique du sol ainsi que sa concentration en chlorures, l'utilisation d'eaux saumâtres altère les processus de formation de la matière organique avec diminution progressive de la fertilité des sols et augmentation de leur imperméabilisation, deux facteurs clé dans le processus de désertification.

Il faut aussi observer que la haute salinité des eaux de surface de la zone représente un élément de dégradation non seulement pour les sols, mais pour les eaux douces de la réserve aquifère. Au niveau de l'embouchure de l'Imera méridional, des phénomènes de salinisation des nappes se produisent en fait par l'entrée de bassins d'eaux de mer, dérivant aussi de la surexploitation des nappes.

Dans une zone fortement orientée sur l'agriculture telle que la plaine de Licata, les eaux de nappes ou les eaux provenant de l'Imera méridional, bien que manifestement peu adaptées à l'utilisation agricole, ont représenté et représentent jusqu'ici une ressource qu'utilisent les agriculteurs pour pallier à la disponibilité limitée de la réserve d'eau, non sans effets sur le sol et les cultures. Ceci s'est notamment produit suite à la diffusion massive des cultures en serre, un secteur moteur de l'économie de Licata, qui modifie actuellement le contexte relatif à la demande et à la disponibilité de la ressource en eau locale. Dans les facteurs

prédisposant à la sécheresse et à la désertification de nature anthropique, il faut donc compter la forte pression humaine sur le territoire de Licata, en termes de surexploitation des nappes aquifères comme en termes d'activité agricole particulièrement intense.

### **5.1.1 PROPOSITIONS D'INTERVENTIONS**

Au jour de l'analyse menée sur la vulnérabilité de la zone d'étude aux phénomènes de sécheresse et de désertification, il ressort un cadre dans lequel aux facteurs naturels tels que les caractéristiques climatiques, la carence qualitative et quantitative de la ressource en eau, la dégradation des sols par salinisation du terrain, l'altération des processus de formation de la matière organique, la baisse de la fertilité et l'imperméabilisation des terrains, s'ajoute une forte pression anthropique sur le territoire qui, au-delà d'entraîner une exploitation excessive des nappes, tend à aggraver certaines des causes naturelles ci-dessus. Quelques propositions d'interventions pouvant prévenir ou atténuer ces facteurs sont donc indiquées ci-après.

Dans le cas présent, du moment que la recherche d'eau de qualité et en quantité permettant de la destiner à l'agriculture représente une question d'intérêt dans le cadre de la lutte contre le processus de désertification dans la zone en question, les mesures proposées en ce lieu concernent:

- l'analyse d'éventuelles sources supplémentaires à destiner à l'approvisionnement en eau pour l'irrigation afin de limiter le recours aux eaux à forte teneur en sel;
- la découverte de techniques appropriées d'utilisation d'eaux saumâtres à usage agricole dans l'optique d'atténuer les effets négatifs liés à leur usage impropre;
- l'identification de mesures de lutte contre le processus de salinisation des sols dans les zones d'irrigation;

- la possibilité d'utiliser des ressources non conventionnelles telles que les eaux usées urbaines épurées ou des eaux dessalées, à destiner à l'irrigation pour faire face aux carences en eau de la zone.

#### 5.1.1.1 Analyse de sources d'eau complémentaires

Selon une étude réalisée quelques années auparavant par l'ENEA (Pizzichini et al., 2002), chaque habitant de Licata consomme près de 37 l d'eau par jour face à une valeur moyenne nationale d'environ 200 l par jour. Dans cette situation, considérée dans de nombreuses études comme un véritable cas limite du contexte italien, la détection de sources d'eau complémentaires représente un défi non seulement en termes de développement socio-économique de la zone, mais aussi dans le cadre de la lutte contre la désertification. À cet effet, on pourrait avant tout prévoir une utilisation plus efficace des eaux de l'Imera méridional, dans le bassin duquel ont été réalisés plusieurs réservoirs de régulation des écoulements de surface:

1. le Villarosa sur le fleuve Morello s'inscrivant dans le territoire de la province d'Enna qui supporte un bassin de 102 km<sup>2</sup> et dont la capacité utile est de près de 10.3 Mm<sup>3</sup>. Géré par l'*Ente Minerario* (Administration Minière) de Sicile pour alimenter les installations industrielles de Pasquasia, il est inutilisé depuis 1992, année de cessation de la production de ce site;
2. l'Olivo, sur le Braemi, situé dans le territoire provincial d'Enna qui supporte un bassin de près de 60 km<sup>2</sup> et d'une capacité utile d'environ 14.9 Mm<sup>3</sup>. Il a été construit par l'*Ente di Sviluppo Agricolo* (Organisme de Développement Agricole) et est utilisé depuis 1983 pour l'irrigation;
3. le Gibbesi, construit sur le même cours d'eau par l'*Ente Minerario* (Administration Minière) de Sicile, à la limite des provinces de Caltanissetta et d'Agrigente, supporte un bassin de 116 km<sup>2</sup> et a une capacité utile

- d'environ 7.9 Mm<sup>3</sup> (6.4 Mm<sup>3</sup>, selon une récente étude hydrologique de SOGESID S.p.A.). Commandé pour un usage industriel et d'irrigation, il n'est pas encore en service (à part une conduite mise par le passé au service de la zone industrielle de Licata, mais qui a récemment été utilisée pour desservir la plaine en eau d'irrigation), toutefois un délibéré régional de 2006 a indiqué un usage exclusivement d'irrigation pour ses eaux de retenue;
4. le Blufi sur l'Imera méridional, encore en phase d'achèvement qui, selon le projet d'exécution, devrait supporter un bassin de 73.2 km<sup>2</sup> et aurait une capacité utile d'environ 22 Mm<sup>3</sup>. Commencé en 1991, il devrait compléter ou satisfaire l'ensemble des besoins en eau potable de huit communes des provinces de Caltanissetta, Enna et Agrigente; cependant, à l'exception d'une traverse à usage d'eau potable située en bout de la future retenue, l'ouvrage est actuellement arrêté, avec des travaux commencés mais stoppés en raison d'un sérieux contentieux et de nombreux problèmes environnementaux, actuellement objets d'étude et d'analyses par les experts de la structure.

Selon ces indications, il semble clair que, à l'exception de l'Olivio dont les eaux de retenue sont actuellement utilisées pour l'irrigation, aucun des autres réservoirs considérés ne remplit totalement sa fonction. Donc, tant l'achèvement du système hydrique du fleuve Imera méridional que l'affectation plus juste de ressources en eau actuellement inutilisées pourraient permettre de compléter des sources d'approvisionnement en eau afin de disposer d'eau de qualité adaptée à destiner à l'agriculture. Concernant notamment le Villarosa, bien qu'une étude réalisée voici quelques années par SOGESID S.p.A. ait trouvé un usage de consommation des eaux de retenue (suite à d'opportuns traitements pour réduire leur forte teneur en sel), on pourrait envisager de destiner à l'irrigation les volumes non utilisés en eau potable.

Dans le cas du Gibbesi par contre, vu la qualité médiocre des eaux de retenue, les études effectuées par le passé ont trouvé dans l'irrigation l'affectation la plus opportune de ces ressources ; toutefois, bien que l'achèvement du réservoir soit au programme des interventions de planification régionale 2006-2001, l'ouvrage n'a pas encore été achevé, soit en raison d'absence de financement soit pour des retards d'ordre administratif.

Une autre hypothèse de complément des sources hydriques concerne une proposition faite par le passé mais qui s'avère encore particulièrement applicable aujourd'hui. Elle concerne l'interception, l'acheminement et la retenue des eaux de certains affluents de l'Imera méridional, à faible valeur de salinité. Au début des années quatre-vingt, l'Aquater S.p.A.(1982) avait mené une étude à ce sujet sur certains cours d'eau affluents de l'Imera méridional et du Platani pour définir le rapport salinité-débit pendant l'année hydrologique afin de pouvoir «fixer la norme d'utilisation des eaux à usage d'irrigation et industriel». Suite à une analyse statistique sur les mesures de salinité en fonction du débit sur la période 1978-1981, l'étude proposait deux hypothèses sur la réalisation de deux réservoirs de stockage: le premier avec les eaux des cours d'eau des torrents San. Cataldo, Binaria, Castellazzo, Braemi et Tardara, le second avec les apports des affluents San Giorgio, Castello et Gangi. Pour la réalisation du premier réservoir notamment, deux solutions différentes étaient envisagées: la première prévoyait de retenir toutes les eaux du Braemi et le débit des autres cours d'eau seulement lorsque la hauteur hydrométrique dépassait 25 cm en lit, et la deuxième impliquait la dérivation de tous les flux des susdits torrents, indépendamment du seuil hydrométrique. Sur la base de ces hypothèses, le premier réservoir aurait présenté une salinité moyenne de l'eau de 2.212 dS/m avec la première solution et de 2.102 dS/m avec la deuxième, le second réservoir une salinité moyenne de 1.284 dS/m.

Malgré le peu de fiabilité des lectures effectuées pour l'estimation de la salinité moyenne (auxquelles ont toutefois été apportées d'opportunes corrections au sein de l'étude), le travail mené par Aquater S.p.A. fait ressortir l'utilité de la susdite proposition afin de disposer d'eau à teneur en sel réduite à des fins d'irrigation. Par conséquent, même si à ce jour, pour ces motifs, seulement les eaux du Braemi ont été stockées, la proposition d'interception et de stockage ultérieur des eaux de certains affluents de l'Imera méridional par rapport à leur salinité pourrait permettre de mieux utiliser les ressources de surface de ce cours d'eau.

Toujours sur le thème de l'intégration des sources d'eau existantes pour la zone objet de l'étude, d'utiles indications peuvent être trouvées dans le Programme des Interventions du Plan de Sauvegarde des Eaux de la Sicile, rédigé par SOGESID S.p.A. en 2007. En effet, parmi les différents objectifs préfixés par le Plan régional pour le système de l'Imera méridional, il est prévu : l'achèvement des systèmes hydriques d'aqueducs, le complément des capacités de réserve actuellement disponibles et l'optimisation des fonctions d'installations d'élévation et de pompage. De plus, et particulièrement pour la Commune de Licata, certaines des interventions programmées qui pourraient contribuer à une augmentation des volumes d'eau disponibles pour la zone concernent l'achèvement du réseau d'eau pour l'apport d'eau potable et le remplacement du réseau d'eau et des conduits d'adduction vétustes et/ou en mauvais état de conservation.

#### **5.1.1.2 Techniques de lutte contre la salinisation du sol**

Tel que précédemment souligné, les eaux du fleuve Salso comme les eaux souterraines qui concernent la zone de Licata présentent des niveaux de salinité variables au cours de l'année, qui les rendent souvent inutilisables pour l'irrigation. Toutefois, compte tenu de la carence actuelle d'autres sources alternatives d'eau de

bonne qualité, les agriculteurs sont obligés d'utiliser des eaux plus ou moins saumâtres pour l'irrigation. Cependant, fait connu, le risque majeur de cette utilisation est l'accumulation de sels dans le sol qui provoque la fameuse salinisation secondaire et qui aboutit, comme conséquence finale, à la désertification.

De récentes études et enquêtes expérimentales ont démontré que des eaux autrefois considérées non utilisables pour l'irrigation peuvent être utilisées sans problème ni risque particulier tant pour les cultures que pour le sol. D'ailleurs, dans de nombreux pays du bassin méditerranéen, des eaux à salinité de 5-8 dS/m sont les seules eaux pouvant être et étant couramment utilisées. De plus, le choix de cultures et de variétés plus ou moins tolérantes à la salinité des eaux (Tableaux 5.1 - 5.2), l'arrivée et l'expansion des installations de micro-irrigation (goutte-à-goutte, tuyau percé, goutteurs, etc.) ont été d'une aide importante pour l'utilisation d'eau à forte concentration saline. Avec l'irrigation par goutte-à-goutte, même des eaux à salinité de 7 dS/m ont donné des résultats analogues aux résultats obtenus avec des eaux normales. La tomate «*Desert Sweet*» cultivée en Israël ou la «*Tomate cerise de Pachino*» en Sicile est un exemple classique.

<b>Tolleranza alla salinità</b>	<b>Soglia di salinità (dS/m)</b>	<b>Livello di produttività zero (dS/m)</b>
Sensibili	1.4	8.0
Moderatamente sensibili	3.0	16.0
Moderatamente tolleranti	6.0	24.0
Tolleranti	10.0	32.0

Tab. 5.1- Seuil de salinité pour quatre groupes de tolérance (Jensen, 1980).

<b>Sensibile</b>	<b>Moderatamente sensibile</b>	<b>Moderatamente tollerante</b>	<b>Tollerante</b>
Mandorlo	Erba medica	Bietola	Barbabietola da zucchero
Melo	Broccolo	Girasole	Cotone
Avocado	Cavolo	Olivo	Palma da datteri
Fagiolo	Pomodoro	Soia	
Carota	Lattuga	Grano	
Pompelmo	Mais		



Arancio	Cocomero
Limone	Vite
Cipolla	Patata
Fragola	Ravanello
Pesco	Riso
Susino	

Tab. 5.2- Exemple de cultures appartenant à quatre groupes de tolérance à la salinité (Jensen, 1980).

Donc, dans l'attente de trouver des sources alternatives d'eau de bonne qualité, on peut envisager d'avoir recours à des mesures de lutte et de mitigation du processus de salinisation, surtout dans le secteur des cultures protégées en trouvant des techniques qui permettent une utilisation appropriée des eaux saumâtres dans l'agriculture. En premier lieu, on peut penser aux mêmes agriculteurs de Licata qui, ces dix dernières années, ont appris seuls et/ou avec l'assistance technique de la SOAT locale, à se protéger des impacts de la sécheresse et du risque de salinisation et de désertification de la zone. Avant tout, selon les caractéristiques du sol, les exploitations agricoles utilisent deux types différents de structures: les serres et les tunnels. Les premières sont réalisées sur les terrains de meilleure qualité (sol sableux ou semi-léger) ou bien en cas d'utilisation de remblais et où l'eau a une plus faible salinité. Les tunnels sont en revanche beaucoup plus utilisés dans le reste de la zone et, afin d'éviter une accumulation excessive de sels dans le sol, ils sont déplacés chaque année, parfois tous les deux ans, pour que les pluies d'hiver puissent laver le terrain. Ces tunnels viennent s'intégrer dans un véritable assolement des cultures: le tunnel est utilisé pour la culture de légumes de plein champ, comme l'artichaut, le fenouil, le chou-fleur, la fève et les céréales (froment). L'exposition des terrains aux pluies d'hiver, tel qu'évoqué précédemment, permet en fait de réduire la teneur en sel et d'optimiser la qualité du sol qui retrouve des caractéristiques plus compatibles avec la culture des légumes.

On sait que le problème de la salinité revêt une importance majeure lorsque les eaux saumâtres sont utilisées sur des terrains argileux et faiblement perméables: c'est

le cas de la plaine objet de l'étude, mais une utilisation appropriée des eaux saumâtres peut, encore une fois, réduire le risque de salinisation des sols de ce type. Une utilisation correcte d'eaux à forte teneur en sel, surtout pour la culture horticole, implique une lixiviation de la zone atteinte par les racines avec des volumes d'irrigation «supérieurs aux niveaux nécessaires pour amener à la capacité du champ la couche de terrain concernée par les racines» (Sciortino e Iapichino, 1995). Le drainage des eaux salines de percolation avec des systèmes traditionnels (muotti: excellents drains d'ancienne fabrication) ou modernes (à tuyaux perforés) devient donc d'importance basilaire. De nombreuses exploitations disposent, en effet, d'un bon réseau de drainage qui éloigne et achemine les eaux salines de percolation à l'extérieur de l'exploitation ou dans des cuves pour leur recyclage après d'opportuns traitements.

À l'intérieur des serres et des tunnels sont exclusivement utilisés des systèmes de micro-irrigation par goutte-à-goutte, tuyaux perforés, ailes en polyéthylène à goutteurs incorporés (*drip-lines*, Fig. 5.2), parfois enterrés (sub-irrigation), qui, avec le paillage, permettent une bonne lixiviation de la rhizosphère, une importante économie dans le nombre et dans le volume des irrigations et une réduction drastique des pertes par évapotranspiration.



Fig. 5.2 - Système de micro-irrigation avec *drip-lines*.

Toujours dans le cadre des mesures locales prises pour se protéger du risque de salinisation des sols, une technique pour pallier à l'utilisation d'eaux saumâtres, qui s'est de plus en plus répandue ces dernières années, concerne la collecte des eaux de pluie depuis les toits des serres (Fig. 5.3), effectuée non seulement pour augmenter les réserves d'eau des exploitations mais pour pouvoir disposer d'eau de bonne qualité. Pour cela, les agriculteurs utilisent des équipements artisanaux de collecte, comme des petites retenues de terre, imperméabilisées par des bâches de plastique, dans lesquelles s'accumule l'eau de pluie (Fig. 5.4 ).



Fig. 5.3 - Collecte des eaux de pluies provenant des toits des serres.

Mais au-delà de servir à la collecte des eaux de pluie, ces retenues sont aussi utilisées par certains agriculteurs pour stocker aussi l'eau prélevée dans le Salso pendant la période hivernale ou dans les puits de l'exploitation pour la mélanger aux eaux de pluie.



Fig. 5.4 - Exemple de retenue pour le stockage d'eaux de pluie (Bellini, 2004).

Par ailleurs, dans certains cas ces retenues sont également utilisées pour mélanger des eaux caractérisées par des diverses valeurs de salinité afin d'en abaisser la teneur finale. Ces dernières années, la technique indiquée par la littérature anglo-saxonne par le terme de "*Cyclic strategy*" avec laquelle les deux types d'eau (saumâtre et de pluie) ne sont pas mélangés (*Blending strategy*), mais conservés et distribués séparément, est en train de se répandre. Généralement, l'agriculteur effectue deux à trois irrigations avec de l'eau saumâtre et une à deux avec de l'eau de pluie. Cette dernière a notamment pour fonction de remplacer l'eau saumâtre dans la zone des racines et, en même temps, d'éliminer les sels qui s'y trouvent. L'agriculteur local a aussi appris qu'à des phases phénologiques particulières du plant, il doit ou peut utiliser l'un ou l'autre type d'eau.

L'eau de pluie représente incontestablement une ressource à laquelle recourir en cas de sévère pénurie d'eau, comme celles qui se produisent dans la zone objet de l'étude, toutefois, son utilisation est essentiellement liée à la pluviométrie de l'année et au développement des capacités de collecte des eaux de pluies de l'exploitation.

D'autres interventions de mitigation de la salinisation du sol, déjà identifiées lors de l'élaboration du (*DICA*, 2007), peuvent être:

- Des labours adossants au centre de la parcelle pour surélever le plan de campagne et favoriser l'écoulement de l'eau vers les fosses latérales;
- Le nivellement du terrain afin d'éviter des stagnations d'eau en surface;
- La création d'un efficace réseau drainant de l'exploitation (drainage tubulaire, «nids d'abeilles», drainages verticaux, etc.);
- La réalisation d'un réseau de drainage collectif pour l'éloignement des sels du sol;
- L'ouverture de canaux en terre intermédiaires (sans parois étanches);
- L'apport de matière organique et d'engrais minéral programmé en fonction des exigences de la culture et de la teneur en éléments nutritifs du sol;
- L'apport de gypse afin d'éloigner le sodium du complexe d'échange du terrain.

Mais au-delà des techniques agronomiques, il serait aussi opportun de consolider les aptitudes des techniciens et des agriculteurs par des cours de formation et de sensibilisation sur des mesures de mitigation de la sécheresse et de la désertification, faciles à adopter dans le cadre de l'exploitation.

#### **5.1.1.3 Recyclage des eaux usées urbaines épurées à des fins d'irrigation**

La disponibilité limitée d'eau dans la zone de Licata peut être combattue en destinant à un usage d'irrigation lesdites « ressources non conventionnelles », à savoir

les sources d'eau complémentaires de qualité inférieure, considérées non adaptées à des utilisations autres qu'agricoles.

Lorsqu'on fait référence à des ressources en eau non conventionnelle, il est avant tout nécessaire de prendre en compte les eaux usées urbaines. Après processus approprié d'épuration assurant la décontamination de ces eaux, les eaux usées épurées peuvent en effet trouver un usage étendu dans le domaine agricole, alternativement à l'usage d'eaux saumâtres. Mais une telle utilisation ne doit pas être introduite uniquement dans l'optique des interventions de lutte contre la salinisation des sols de Licata, elle doit aussi être considérée comme une mesure de « souffle » pour l'environnement car elle permet d'éviter le déversement des effluents des installations de dépuración dans les nappes d'eau.

Relativement à la situation de la zone objet de l'enquête, il y a quelques années, dans le cadre dudit «Projet Licata» (*Pizzichini et al.*, 2002), il avait été proposé de réutiliser pour l'irrigation les eaux usées dépurées par l'usine de Licata. En effet, suite à la sévère crise de l'eau qui a concerné pratiquement toute la Sicile en 2002, mais surtout la partie plus au Sud de l'île, la Commune de Licata avait demandé à l'ENEA, déjà engagé dans des opérations de lutte contre la désertification dans la région, de mettre au point une proposition pour faire face aux problèmes de graves pénuries en eau qui touchaient la ville, véritable cas limite de zone avec de fortes carences en eau douce. Selon les informations de cette étude, l'usine de dépuración dont bénéficie la commune de Licata, où arrivent uniquement les eaux usées des secteurs de la ville actuellement branchés au réseau d'assainissement, décharge en mer près de 1000 m<sup>3</sup> d'eaux usées dépurées par jour (Fig. 5.5). Aux fins d'une utilisation pour l'irrigation, le COD (*Chemical Oxygen Demand*, un indice qui mesure le degré de pollution de l'eau par des substances oxydables, principalement organiques) qui caractérise ces eaux, de 120 ppm, les rend assez compatibles avec

l'utilisation en agriculture. Toutefois, les traces de métaux lourds détectables, la forte teneur en chlorures et une certaine présence de flore bactérienne imposeraient de recourir à un procédé de traitement plus avancé pour un éventuel usage agricole. Mais malgré la nécessité d'approfondir le processus de dépuración, les eaux usées dépurées de Licata pourraient fournir aux agriculteurs un volume d'eau quotidien de 2000 m<sup>3</sup>, égal à la somme des volumes actuellement déversés en mer précédemment évoqués, plus 1000 m<sup>3</sup>/jour qui devraient être obtenus avec l'achèvement du réseau d'assainissement de la ville. Ces quantités quotidiennes d'eau pourraient ensuite augmenter (jusqu'à une valeur de près de 3800 m<sup>3</sup>/jour) en prévoyant un procédé de dépuración aussi pour les eaux du Salso à proximité de l'embouchure qui s'avèrent contaminées par des décharges organiques dues à des égouts abusifs.



Fig. 5.5 - Déversement en mer des eaux usées de l'usine de dépuración de Licata (Pizzichini et al., 2002).

L'attention est attirée sur le fait que, parallèlement à l'adaptation et à l'achèvement du réseau d'assainissement et à l'adaptation de l'usine d'épuración au Décret Législatif 152/06, la réutilisation des eaux usées aux fins d'irrigation dans la commune de Licata entre dans le cadre des actions prévues par le «Programme des

Interventions» du Plan de Sauvegarde des Eaux pour le système du bassin de l'Imera méridional. Toutefois, avant de mettre en œuvre une intervention de ce type, les administrations locales devront promouvoir une culture qui incite à l'utiliser. Aujourd'hui encore, la ressource constituée par les eaux usées suscite un certain scepticisme qui en pénalise particulièrement l'usage. Il serait donc opportun de mener des enquêtes préalables sur les avis des agriculteurs locaux sur la réutilisation des eaux usées, de lancer des campagnes d'information sur le thème et, éventuellement, de mettre en œuvre des programmes d'encouragement pour en promouvoir l'usage.

Ceci dit, malgré les opinions qui dominent, certains agriculteurs de Licata ont déjà mis en œuvre un processus d'utilisation des eaux usées dépurées. Il est intéressant de rappeler, en effet, que trois associations de producteurs locaux ont réalisé un ouvrage de canalisation depuis le dépurateur de la ville jusqu'à un bassin commun qui permet de distribuer aux membres qui en font la demande l'eau traitée pour l'irrigation. Dans la section du Fleuve Vecchio par exemple, 44 exploitations qui utilisent cette eau adhèrent déjà à l'association CORA.

#### **5.1.1.4 Utilisation d'eaux dessalées**

Dans l'optique de rationalisation des sources d'eau existantes, on peut penser à la mer en tant que ressource particulièrement précieuse et pratiquement inépuisable. Parmi les sources non conventionnelles, il faut aussi compter les eaux marines soumises à dessalement qui, bien qu'obtenues à des coûts souvent élevés, peuvent représenter une importante ressource d'eau complémentaire. Cependant, le dessalement ne concerne pas seulement les eaux de mer. Dans le cas spécifique de la zone en objet, on pourrait effectivement penser à soumettre au dessalement aussi bien les eaux du fleuve Salso que celles des puits artésiens dont l'utilisation, comme déjà évoqué, peut représenter, par leur forte teneur en sel, un facteur de risque important



pour le sol, susceptible de compromettre sa fertilité et la capacité d'utilisation dans le temps en provoquant des problèmes de salinisation induite ou secondaire.

Concernant l'utilisation d'eaux dessalées dans la zone d'examen, la ville de Licata, avec plusieurs communes limitrophes, exploite actuellement les eaux provenant du dessaleur de Gela, qui répondent partiellement aux besoins en eau potable d'une zone trop souvent exposée à de graves carences en eau, comme celle d'Agrigente. En théorie, notamment suite à la récente mise en œuvre de nouveaux modules du système, l'eau fournie par le dessaleur de Gela pourrait satisfaire une bonne partie des besoins des communes desservies, mais elle s'avère en fait nettement insuffisante en raison de divers facteurs qui réduisent en fin de compte inévitablement la disponibilité d'eau : pertes sur le réseau et interruptions du service de distribution pour réparations et entretien ainsi que vols le long des conduites qui témoignent d'une forte demande d'eau pour des usages domestiques ou d'irrigation.

Toujours dans le cadre du «Projet Licata» (*Pizzichini et al.*, 2002), il avait déjà été proposé, il y a quelques années, de compléter les volumes d'eau fournis par l'installation de Gela par ceux d'un petit dessaleur à réaliser dans la région de Licata, d'une capacité de 10500 m<sup>3</sup>/jour d'eau à usage de consommation, provenant du dessalement de l'eau de mer. Bien qu'étudié à des fins essentiellement domestiques, cette installation aurait assuré un supplément de 2500 m<sup>3</sup>/j qui aurait pu satisfaire les besoins agricoles. De plus, l'autosuffisance en eau qui aurait ainsi touché la Commune de Licata aurait eu un effet bénéfique aussi sur l'économie hydrique des communes limitrophes qui auraient pu bénéficier d'au moins 1500 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable supplémentaires, destinés à la ville de Licata, provenant du dessaleur de Gela. Dans le cas présent, le dessaleur proposé, à réaliser selon le type à osmose inversée, aurait dû opérer en continu, 24 h/24, pour garantir un rendement de 38%. Par rapport à l'emplacement de l'installation, la proposition indiquait la zone orientale du centre

ville, à proximité de la mer et à une distance minimale de 800 m de l'usine d'épuration pour des raisons de nature hygiénique et sanitaire.

Toutefois, bien que la construction d'un dessaleur de ce type (ou, en alternative, l'agrandissement et la modernisation du dessaleur de Gela, par ailleurs déjà au programme d'interventions de l'Agence Régionale pour les Déchets et les Eaux) puisse assurer l'autosuffisance en eau de Licata, il serait bon de réaliser préalablement une étude de faisabilité afin d'évaluer l'avantage d'une telle installation. Au-delà des inévitables effets sur l'environnement liés à des déséquilibres chimiques et biologiques causés aux organismes marins par le rejet en mer d'une eau plus salée et par l'évacuation des produits chimiques utilisés dans le dessalement, les coûts de production doivent aussi être sérieusement estimés. En effet, bien qu'il soit possible d'utiliser des énergies renouvelables pour le fonctionnement de l'installation (énergie éolienne ou solaire) pour compenser une partie des coûts, l'affectation des eaux dessalées à l'irrigation pourrait s'avérer particulièrement coûteuse. Bien que l'hypothèse de réaliser une installation de dessalement soit envisagée depuis les années Soixante, celle-ci a en effet été rejetée car, même à cette époque le coût au mètre cube (77 livres) était inacceptable pour l'agriculture (*Ballatore*, 1968). C'est justement en raison des coûts de production élevés du dessalement des eaux que le recours à des mini-installations de dessalement, actuellement utilisées par quelques agriculteurs locaux pour réduire la teneur en sel des eaux saumâtres du Salso ou de puits à destiner à l'irrigation, ne s'est pas largement répandu dans la région.

## **5.2 ENQUÊTE EXPÉRIMENTALE SUR LES EFFETS D'EAUX SAUMÂTRES ET D'EAUX DE PLUIE SUR LA PRODUCTIVITÉ DE CULTURES EN SERRES.**

Le risque de salinisation secondaire auquel sont exposés les sols de Licata en raison de l'irrigation effectuée avec les eaux saumâtres disponibles dans la zone a été

recherché par la réalisation d'une enquête expérimentale dans une exploitation agricole de la zone d'étude.

Le but de cette enquête était donc d'évaluer les impacts sur le sol et sur la production agricole des différentes interventions d'irrigation effectuées en utilisant soit de l'eau saumâtre soit de l'eau de pluie. Deux opérations conjointes et parallèles ont été effectuées à cet effet : le monitoring des valeurs de salinité du terrain et de l'eau utilisée pour l'irrigation au cours de toute la saison d'irrigation, mené par le Département d'Agronomie Environnementale et Territoriale de la Faculté Agricole de l'Université des Études de Palerme et la réalisation d'opportuns relevés à caractère agronomique sur la culture étudiée et notamment sur la production, tant du point de vue quantitatif que qualitatif, dirigée par le DICA de Catane. Matériels et méthodes utilisés et résultats obtenus de la deuxième opération.

### **5.2.1 Matériels et méthodes**

L'enquête expérimentale a été effectuée dans l'exploitation agricole de M. Giuseppe Cammilleri, située dans la section du Vecchio, à environ deux kilomètres de Licata. Cette exploitation a été choisie en raison des infrastructures dont elle dispose, nécessaires à la réalisation de l'intervention :

- diverses serres;
- structures de collecte des eaux de pluies (provenant des toits des serres);
- bassin de stockage des eaux de pluie prévues pour l'irrigation (Fig. 5.6);
- un puits à grande ouverture (profondeur env. 4 m) d'eau saumâtre (Fig. 5.7);
- Un système de micro-irrigation à ligne goutte-à-goutte (*driplines*).



Fig. 5.6 - Puits d'exploitation à grande ouverture.



Fig. 5.7 - Bassin d'eaux de pluies collectées des toits des serres.

Le monitoring de la salinité a été effectué sur trois parcelles cultivées de tomates de table, variété Naxos, sur la période septembre 2007-février 2008 et de melons sur la période mars-mai 2008, avec trois systèmes et trois répétitions, et à savoir avec:

- irrigation à l'eau de pluie collectée des toits des serres et stockée dans un bassin de terre, imperméabilisé avec bâche de plastique (système EP);
- irrigation à l'eau saumâtre prélevée dans un puits de l'exploitation (Système ES);

- Irrigation alternée avec les deux eaux, deux à trois irrigations à l'eau saumâtre et une à deux irrigations à l'eau de pluie (Systèmes EP-ES), conformément aux accords de gestion de l'irrigation couramment adoptés dans l'exploitation.

Ce dernier système (mixte) reflète la méthode normalement utilisée par les agriculteurs dans le cadre de l'irrigation de la zone. Dans ce cas, le nombre d'arrosages à l'eau saumâtre et de pluie est fixé par l'agriculteur et dépend en général essentiellement de l'évolution climatique et notamment de la pluviosité (qui permet de stocker plus ou moins d'eau de pluie et donc de faire augmenter ou diminuer les réserves en eau de l'exploitation) et des variations de température de la saison. Par exemple, si la température reste élevée par rapport à la moyenne saisonnière, le plant a tendance à se développer davantage. L'agriculteur arrose alors à l'eau saumâtre pour ralentir sa pousse. Au contraire, si la température reste basse, l'arrosage est effectué à l'eau de pluie.

L'enquête expérimentale a commencé durant la période estivale 2007 avec les travaux de préparation à l'intérieur des serres (Fig. 5.8) consistant en un labourage à 40-50 cm à la houe et un léger fraissage à 20-30 cm à la bineuse. Le 22/07/07, après mouillage de la couche superficielle du sol avec le système de nébulisation pendant près d'une demi-heure, il a été réalisé le traitement de décontamination du sol avec une solution à 60% de dichloropropène (Telone) sur 1000 m<sup>2</sup>. Ensuite, le mouillage superficiel du terrain a été effectué tous les deux jours pendant une semaine. Enfin, le 10/08/07 il a été effectué un traitement au Métam-potassium (fumigant) 100 l/1000 m<sup>2</sup>. L'enquête a donc concerné deux cultures : la tomate de table et le melon.



Fig. 5.8 - Serres pendant la préparation du terrain.

### ***Tomate***

Le repiquage des plants de tomate, variété Naxos (Camones) a été effectué le 5 septembre 2007. Les plants de tomate (Fig. 5.9) ont été repiqués à une distance de 0.90 m entre les rangées et de 0.35 m le long de la rangée (3.170 plants/1000 m<sup>2</sup>). Les mêmes procédures et traitements ont été effectués sur toutes les parcelles. L'irrigation a été effectuée avec un système de micro-irrigation par goutte avec une ligne goutte-à-goutte (dripline) à goutteurs incorporés dans le tuyau de polyéthylène séparés de 33 cm et à un débit de 4 l/h à une pression de 1 bar.

Pour chaque parcelle et chaque intervention d'arrosage, le propriétaire (M. G. Cammilleri), au-delà de la durée pour déterminer le volume d'irrigation correspondant, mesurait la conductivité électrique, en mS/cm, de l'eau utilisée (Fig. 5.10, Tab. 5.3, Fig. 5.11 et 5.12). Il est à noter que la variabilité des valeurs de la conductivité de l'eau prélevée dans le puits est liée à l'évolution climatique. Les pluies influencent le niveau de la nappe, donc aussi les valeurs de conductibilité électrique (Fig. 5.11). De plus, des échantillons d'eau et de terre ont été régulièrement prélevés, à analyser pour monitorer la salinité du sol des parcelles relatives aux trois systèmes en fonction du type d'eau utilisé.



Fig. 5.9 - Parcelles expérimentales de tomate de table cultivée en serre.



Fig. 5.10 - Contrôle de la conductivité électrique de l'eau avant l'intervention d'arrosage.



La durée totale de l'irrigation à l'eau saumâtre prélevée du puits a été de 1034 minutes (soit 17,23 heures). Le volume d'irrigation sur la parcelle de 500 m<sup>2</sup> pour les 1585 plants a été obtenu en tenant compte d'un goutteur par plant, d'un débit de 4 l/h. En considérant la durée totale de l'irrigation, le volume d'arrosage global sur la parcelle est donc de 109 259 litres (1 x 4 x 1585 x 17.23), soit d'environ 109 m<sup>3</sup>.

Concernant l'irrigation à l'eau de pluie prélevée dans le bassin, la durée totale de l'arrosage a été de 17,83 heures, avec un volume d'irrigation global sur la parcelle d'environ 113 m<sup>3</sup>.

La première récolte a été effectuée le 14/12/07 (Fig. 5.13, 5.14 et 5.15) et les suivantes environ toutes les semaines jusqu'à la dernière, le 20/02/08. Pour chaque réplique des trois systèmes, 10 plantes échantillons ont été choisies selon le schéma en W préconisé par la Directive 2002/63/CE du 11/07/2002 de la Commission Européenne (G.U. n° 221 - Décret du 23 septembre 2003). Pour les 10 plants échantillons de chaque système et réplique, le poids et le nombre de fruits récoltés ont été enregistrés.

Concernant la qualité du produit en début de récolte (14/12/07), en phase intermédiaire (17/01/08) et en fin de campagne (20/02/08), 9 échantillons par système et réplique ont été prélevés, pour un total de 27 échantillons et les analyses physico-chimiques suivantes des fruits ont été effectuées: consistance, solides solubles totaux, acidité titrable, glucose, fructose, saccharose et résidu sec. Pour l'analyse de la consistance, il a été utilisé un échantillon de 10 tomates alors que pour les autres analyses, l'échantillon était composé d'environ un kg de fruits par réplique. Cet échantillon a été homogénéisé et centrifugé.

IRRIGAZIONE CON ACQUA SALMASTRA				IRRIGAZIONE CON ACQUA PIOVANA			
Data	Durata adacquamento (min)	Durata cumulata (min)	Conducibilità elettrica dell'acqua (mS/cm)	Data	Durata adacquamento (min)	Durata cumulata (min)	Conducibilità elettrica dell'acqua (mS/cm)



22.07.2007	90	90	3700	22.07.2007	90	90	1400
29.07.2007	60	150	5900	29.07.2007	60	150	1500
09.08.2007	60	210	6100	09.08.2007	60	210	1900
10.09.2007	15	225	6300	10.09.2007	15	225	2200
29.09.2007	35	260	500	29.09.2007	35	260	1400
02.10.2007	30	290	1000	02.10.2007	30	290	1300
05.10.2007	45	335	2200	05.10.2007	45	335	1300
09.10.2007	45	380	3300	09.10.2007	45	380	1300
12.10.2007	25	405	3500	12.10.2007	45	425	1500
16.10.2007	60	465	3100	16.10.2007	60	485	1500
20.10.2007	60	525	6000	20.10.2007	60	545	1500
22.10.2008	60	585	6700	24.10.2008	60	605	1100
29.10.2007	60	645	6200	29.10.2007	60	665	1100
05.11.2007	30	675	6200	05.11.2007	30	695	900
10.11.2007	45	720	6500	10.11.2007	45	740	900
16.11.2007	50	770	6200	16.11.2007	50	790	900
21.11.2007	40	810	6300	21.11.2007	40	830	900
30.11.2007	20	830	6000	30.11.2007	20	850	700
10.12.2007	30	860	4600	10.12.2007	30	880	600
20.12.2007	24	884	200	20.12.2007	40	920	500
30.12.2007	10	894	200	30.12.2007	10	930	500
09.01.2008	30	924	150	09.01.2008	30	960	600
17.01.2008	30	954	1000	17.01.2008	30	990	600
28.01.2008	50	1004	2300	28.01.2008	50	1040	700
15.02.2008	30	1034	5300	10.02.2008	30	1070	700

Tab. 5.3 - Interventions d'arrosage, durée et conductivité électrique de l'eau (tomate).

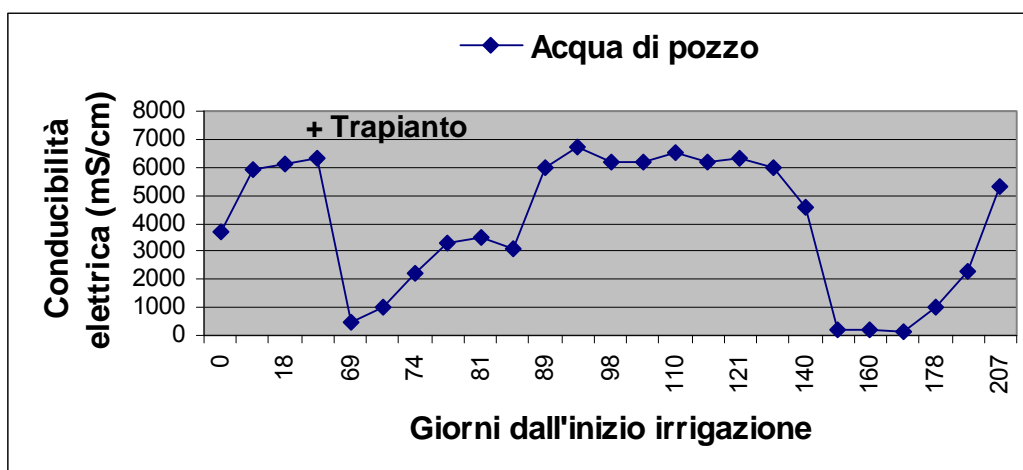


Fig. 5.11 - Evolution des valeurs de conductivité électrique de l'eau prélevée du puits pour l'arrosage de la tomate.

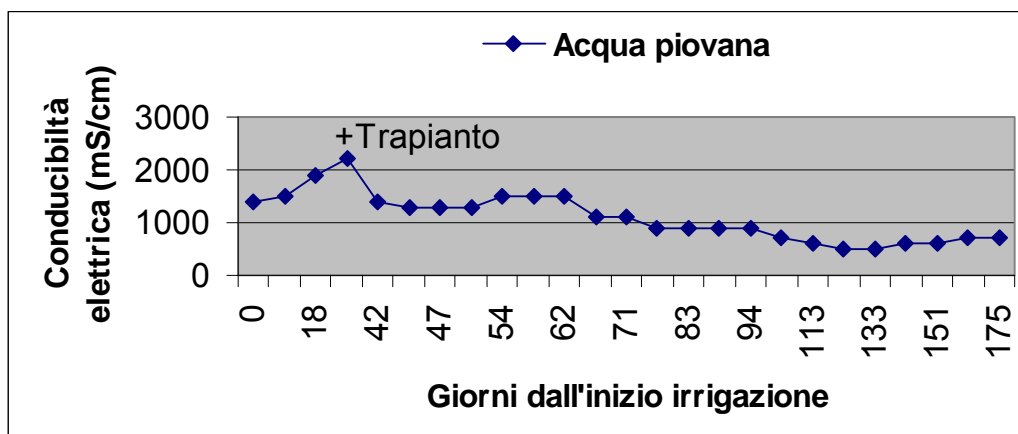


Fig. 5.12 - Évolution des valeurs de conductibilité électrique de l'eau prélevée du bassin.

La consistance des fruits a été déterminée à l'aide d'un pénétromètre, sur chaque fruit, en pratiquant deux estimations à des points opposés et situés à peu près à la moitié de chaque «joue», après retrait d'un fin disque de peau d'un diamètre de 12 à 15 mm.

Les solides solubles totaux ont été déterminés, selon la méthode UNI EN 12630:2000, en mesurant l'indice de réfraction à une température de 20°C et exprimé en grammes de saccharose pour 100 grammes ou degrés Brix.

L'acidité titrable du jus a été mesurée, selon les prescriptions de la méthode UNI EN 12147:1999, par titrage avec sodium hydroxyde en mode potentiométrique avec électrode de verre. L'acidité a été exprimée en mmoles de H<sup>+</sup> par litre.

Selon la méthode UNI EN 12630:2000, les sucres ont été déterminés en HPLC avec séparation à l'aide d'une colonne à échange cationique par élution isocratique avec une solution aqueuse de sel bisodique d'EDTA. Les sucres ont été identifiés par détecteur à indice de réfraction différentiel.

Le résidu sec a été déterminé par séchage du jus à l'aide de la thermobalance à une température de 105°C pendant 35 minutes.



Fig. 5.13 - Première récolte de tomates Système EP.



Fig. 5.14 - Première récolte de tomates Système ES.



Fig. 5.15 - Première récolte de tomates Système EP-ES.

### ***Melon***

La même méthodologie a été appliquée pour la culture de melons (*Cucumis melo* L. fam. Cucurbitaceae). Le repiquage des plants a été fait début mars à une distance de 2 x 1 m (500 plants/1000 m). Pour l'arrosage, le même système, décrit précédemment, a été utilisé mais avec 2 lignes par rangée, donc 6 goutteurs par plant. Là aussi, pour chaque parcelle et chaque intervention d'arrosage, au-delà de la durée pour déterminer le volume d'irrigation correspondant, le propriétaire a mesuré la conductivité électrique (en mS/cm) de l'eau utilisée (Tab. 5.4, Fig. 5.16 et 5.17).

Concernant le melon, la durée totale d'arrosage, tant pour le système ES qu'EP a été de 19 heures, le volume d'arrosage global sur toute la parcelle de 250 plants a été d'environ 114 m<sup>3</sup> (4 x 6 x 250 x 19).

La récolte a été effectuée fin mai. Cependant, une augmentation de la température en deuxième partie de mai et une sérieuse attaque de *Fusarium* ont

contraint le propriétaire à effectuer la récolte simultanée sur les trois systèmes. Par ailleurs, surtout pour des raisons financières, il n'a pas été possible d'effectuer le contrôle de la production des différentes répliques, le contrôle de la production de toute la parcelle de chaque système a donc été effectué. Concernant les répliques de chaque système, 10 fruits ont été prélevés au hasard et ont été pesés pour déterminer leur poids moyen. Enfin, trois fruits ont été pris au hasard pour chaque système, un par réplique, pour effectuer des analyses qualitatives°. Par rapport à ces dernières, il a été considéré: le poids frais (g), le poids sec (g), la matière sèche en %, la longueur du fruit (cm), la largeur du fruit (cm), l'épaisseur de l'écorce (cm), l'épaisseur de la pulpe (cm), la longueur des cavités (cm), l'indice de réfraction à une température de 20 °C (°Brix) et les paramètres chromatiques de l'écorce et de la pulpe.

IRRIGAZIONE CON ACQUA SALMASTRA				IRRIGAZIONE CON ACQUA PIOVANA			
Data	Durata adacquamento (min)	Durata cumulata (min)	Conducibilità elettrica dell'acqua (mS/cm)	Data	Durata adacquamento (min)	Durata cumulata (min)	Conducibilità elettrica dell'acqua (mS/cm)
11.03.2008	180	180	1400	11.03.2008	180	180	700
18.03.2008	90	270	4000	18.03.2008	90	270	700
26.03.2008	75	345	4500	26.03.2008	75	345	700
30.03.2008	90	435	4100	30.03.2008	90	435	700
06.04.2008	60	495	3000	06.04.2008	60	495	700
11.04.2008	90	585	4100	11.04.2008	90	585	700
18.04.2008	90	675	5200	18.04.2008	90	675	700
24.04.2008	60	735	5600	24.04.2008	60	735	700
29.04.2008	60	795	6200	29.04.2008	60	795	700
03.05.2008	90	885	6200	03.05.2008	90	885	700
07.05.2008	75	960	6000	07.05.2008	75	960	700
11.05.2008	60	1020	5800	11.05.2008	60	1020	700
16.05.2008	60	1080	5800	16.05.2008	60	1080	700
23.05.2008	60	1140	5800	23.05.2008	60	1140	700

Tab. 5.4 - Interventions d'arrosage, durée et conductivité électrique de l'eau (melon).

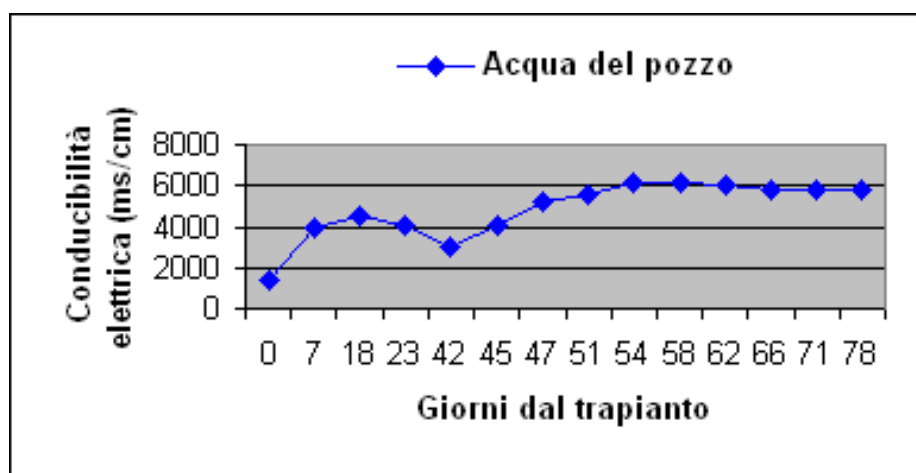


Fig. 5.16 - Évolution des valeurs de conductibilité électrique de l'eau Prélevée du bassin pour l'arrosage du melon.

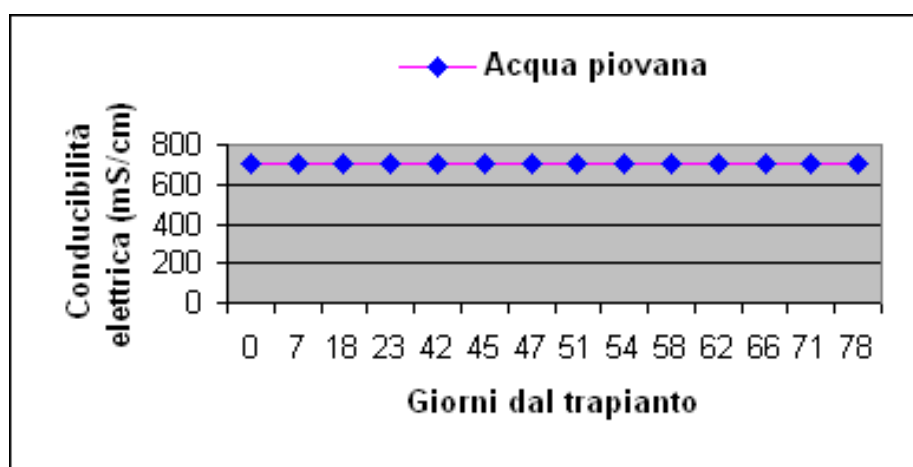


Fig. 5.17 - Évolution des valeurs de conductibilité électrique de l'eau de pluie pour l'arrosage du melon.

### 5.3 Risultats

#### *Tomate*

Les résultats de la production quantitative en termes de poids total, nombre et poids moyen des fruits récoltés sur les 10 plants échantillons (Fig. 5.18), sur toute la période de récolte, pour chacune des trois répliques de chaque système précédemment décrit, sont indiqués dans le Tableau 5.5. Les tableaux 5.6, 5.7 et 5.8 indiquent par contre les valeurs de production moyenne cumulée, du nombre moyen de fruits et du poids moyen cumulé des fruits relatifs aux trois systèmes (Fig. 5.19, 5.20 et 5.21).





Fig. 5.18 - Plants échantillons.

DESCRIZIONE/TESI	Acqua Piovana (AP)				Acqua Salmastra (AS)				Mista (AP-AS)			
	Repliche				Repliche				Repliche			
<b>Raccolta 14/12/07</b>	1	2	3	Media	1	2	3	Media	1	2	3	Media
Peso (kg)	1.0	1.7	1.1	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.0	1.5	1.3
Numero di frutti	10.0	19.0	15.0	14.7	20.0	21.0	19.0	20.0	14.0	13.0	18.0	15.0
Peso medio frutti (gr)	100.0	89.5	73.3	87.6	65.0	66.7	68.4	66.7	92.9	76.9	83.3	84.4
<b>Raccolta 18/12/07</b>												
Peso (kg)	0.8	1.0	0.8	0.9	0.7	1.0	1.2	1.0	0.9	0.7	0.7	0.8
Numero di frutti	10.0	12.0	8.0	10.0	11.0	15.0	18.0	14.7	11.0	9.0	10.0	10.0
Peso medio frutti (gr)	80.0	83.3	93.8	85.7	59.1	66.7	66.7	64.1	77.3	77.8	70.0	75.0
<b>Raccolta 27/12/07</b>												
Peso (kg)	2.3	2.7	2.6	2.5	1.5	1.6	1.6	1.6	2.3	2.5	2.2	2.3
Numero di frutti	25.0	33.0	37.0	31.7	25.0	26.0	28.0	26.3	31.0	35.0	32.0	32.7
Peso medio frutti (gr)	92.0	80.3	68.9	80.4	60.0	59.6	57.1	58.9	74.2	71.4	68.8	71.5

<b>Raccolta 03/01/08</b>												
Peso (kg)	2.5	2.7	2.7	2.6	2.1	2.5	2.9	2.5	2.0	1.9	2.7	2.2
Numero di frutti	30.0	37.0	41.0	36.0	39.0	43.0	45.0	42.3	32.0	33.0	45.0	36.7
Peso medio frutti (gr)	83.3	73.0	65.9	74.1	53.8	58.1	64.4	58.8	62.5	57.6	60.0	60.0
<b>Raccolta 10/01/08</b>												
Peso (kg)	2.6	2.0	2.0	2.2	2.3	2.1	2.0	2.1	2.2	2.0	1.8	2.0
Numero di frutti	39.0	32.0	34.0	35.0	40.0	36.0	37.0	37.7	39.0	37.0	33.0	36.3
Peso medio frutti (gr)	66.7	62.5	58.8	62.7	57.5	58.3	54.1	56.6	56.4	54.1	54.5	55.0
<b>Raccolta 17/01/08</b>												
Peso (kg)	2.3	1.6	2.0	2.0	2.0	1.3	1.5	1.6	1.3	1.5	1.4	1.4
Numero di frutti	38.0	28.0	38.0	34.7	40.0	25.0	29.0	31.3	26.0	27.0	27.0	26.7
Peso medio frutti (gr)	60.5	57.1	52.6	56.8	50.0	52.0	51.7	51.2	50.0	55.6	51.9	52.5
<b>Raccolta 28/01/08</b>												
Peso (kg)	2.2	1.9	1.8	2.0	1.1	1.8	2.1	1.7	2.1	1.5	1.8	1.8
Numero di frutti	41.0	37.0	39.0	39.0	22.0	38.0	41.0	33.7	40.0	31.0	36.0	35.7
Peso medio frutti (gr)	53.7	51.4	46.2	50.4	50.0	47.4	51.2	49.5	52.5	48.4	50.0	50.3
<b>Raccolta 05/02/08</b>												
Peso (kg)	3.1	1.6	1.8	2.2	1.7	1.5	1.3	1.5	2.0	1.5	1.2	1.6
Numero di frutti	50.0	30.0	33.0	37.7	32.0	28.0	25.0	28.3	38.0	30.0	22.0	30.0
Peso medio frutti (gr)	62.0	53.3	54.5	56.6	53.1	53.6	52.0	52.9	52.6	50.0	54.5	52.4
<b>Raccolta 11/02/08</b>												
Peso (kg)	2.7	1.8	1.7	2.1	1.3	1.7	1.8	1.6	1.9	1.4	1.7	1.7
Numero di frutti	47.0	34.0	35.0	38.7	26.0	32.0	36.0	31.3	35.0	26.0	35.0	32.0
Peso medio frutti (gr)	57.4	52.9	48.6	53.0	50.0	53.1	50.0	51.0	54.3	53.8	48.6	52.2
<b>Raccolta 15/02/08</b>												
Peso (kg)	2.5	1.5	1.5	1.8	1.2	1.4	1.5	1.4	1.6	1.0	1.5	1.4
Numero di frutti	42.0	30.0	28.0	33.3	23.0	27.0	30.0	26.7	29.0	22.0	28.0	26.3
Peso medio frutti (gr)	59.5	50.0	53.6	54.4	52.2	51.9	50.0	51.3	55.2	45.5	53.6	51.4
<b>Raccolta 20/02/08</b>												
Peso (kg)	2.0	2.4	3.1	2.5	3.6	3.6	3.5	3.6	1.6	2.5	1.8	2.0
Numero di frutti	40.0	49.0	62.0	50.3	69.0	73.0	69.0	70.3	35.0	57.0	39.0	43.7
Peso medio frutti (gr)	50.0	49.0	50.0	49.7	52.2	49.3	50.7	50.7	45.7	43.9	46.2	45.2

Tab. 5.5 - Production (kg) des plants échantillons par Système et répliques lors de la période de récolte.

<b>Data raccolta/Tesi</b>	<b>Acqua Piovana (AP)</b>		<b>Acqua Salmastra (AS)</b>		<b>Mista (AP-AS)</b>	
10-14/12/07	1.27	a	1.33	a	1.27	a
18.12.2007	2.12	a	2.28	a	2.02	a
27.12.2007	4.62	a	3.83	a	4.35	a
03.01.2008	7.25	a	6.33	a	6.55	a
10.01.2008	9.45	a	8.47	a	8.55	a
17.01.2008	11.42	a	10.07	b	9.95	b
28.01.2008	13.38	a	11.73	b	11.75	b



05.02.2008	15.55	a	13.23	b	13.32	b
11.02.2008	17.62	a	14.83	a	14.98	a
15.02.2008	19.45	a	16.20	b	16.35	b
20.02.2008	21.95	a	19.77	ab	18.32	b

Tab. 5.6 - Production moyenne cumulée (kg) des plants échantillons par Système lors de la période de récolte.

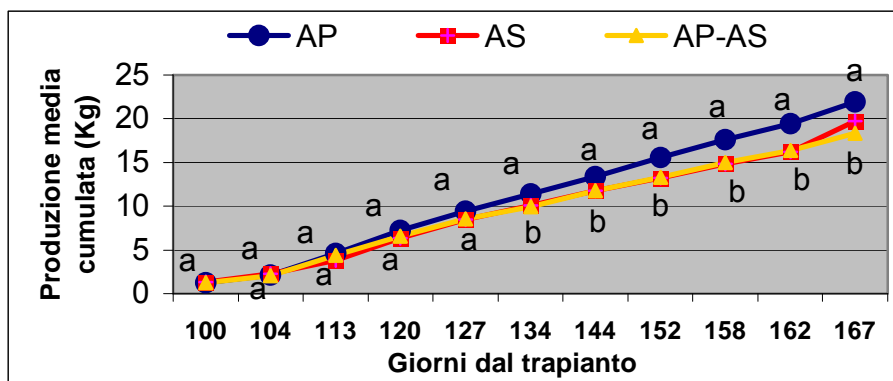


Fig. 5.19 - Production moyenne cumulée des plants échantillons par Système (kg) lors de la période de récolte.

Data raccolta	Acqua Piovana (AP)		Acqua Salmastra (AS)		Mista (AP-AS)	
10-14/12/07	14.67	a	20.00	a	15.00	a
18.12.2007	24.67	b	34.67	a	25.00	ab
27.12.2007	56.33	a	61.00	a	57.67	a
03.01.2008	92.33	a	103.33	a	94.33	a
10.01.2008	127.33	a	141.00	a	130.67	a
17.01.2008	162.00	ab	172.33	a	157.33	b
28.01.2008	201.00	ab	206.00	a	193.00	b
05.02.2008	238.67	a	234.33	a	223.00	a
11.02.2008	277.33	a	265.67	a	255.00	a
15.02.2008	310.67	a	292.33	a	281.33	a
20.02.2008	361.00	a	362.67	a	325.00	b

Tab. 5.7 - Nombre moyen cumulé de fruit par Système.

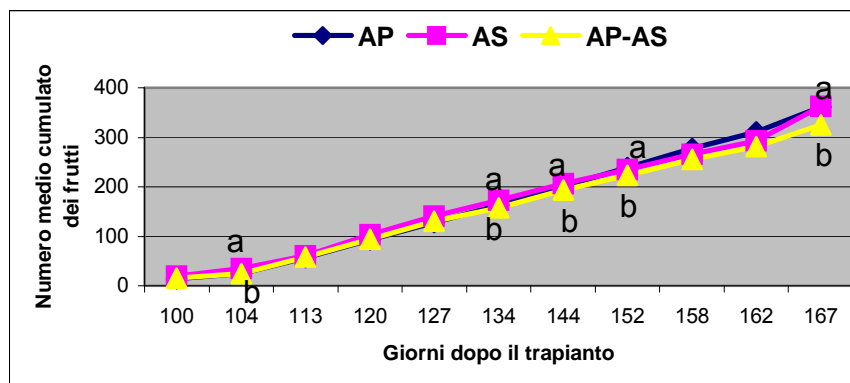


Fig. 5.20 - Nombre moyen cumulé de fruits échantillons par Système (kg) lors de la période de récolte.

Data raccolta	Acqua Piovana (AP)		Acqua Salmastra (AS)		Mista (AP-AS)	
10-14/12/07	87.60	a	66.70	a	84.37	a
18.12.2007	85.00	a	64.77	b	75.00	a
27.12.2007	78.95	a	58.86	b	71.43	a
03.01.2008	73.15	a	59.06	b	60.00	b
10.01.2008	62.86	a	56.64	b	55.05	b
17.01.2008	56.73	a	51.06	b	52.50	b
28.01.2008	50.43	a	49.50	a	50.47	a
05.02.2008	57.52	a	52.94	b	52.22	b
11.02.2008	53.45	a	51.06	b	52.08	ab
15.02.2008	55.00	a	51.25	b	51.90	b
20.02.2008	59.67	a	50.71	b	45.04	c

Tab. 5.8 - Poids moyen cumulé (g) des fruits échantillons par Système lors de la période de récolte.

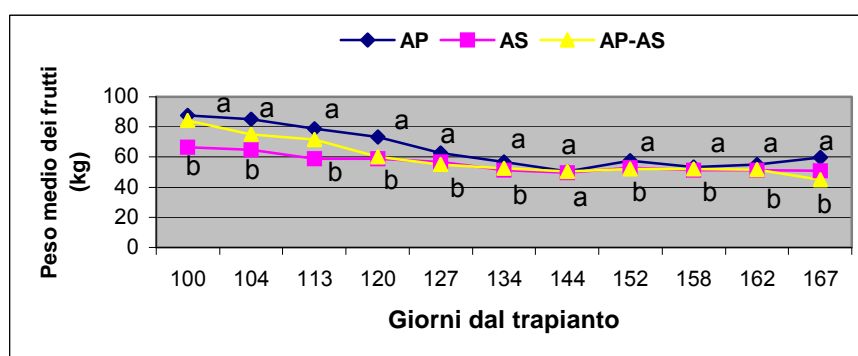


Fig.. 5.21 - Poids moyen cumulé des fruits échantillons par Système (kg) lors de la période de récolte.

Concernant en revanche les analyses qualitatives<sup>2</sup> effectuées sur les fruits échantillons des trois systèmes de la tomate objet de l'enquête, les valeurs moyennes ont été indiquées dans le Tableau 5.9e en Figure 5.22.

Analisi	Unità	Fase di Raccolta	TESI					
			AP		AS		AP-AS	
CONSISTENZA	kg	Iniziale	6.09	a	7.03	a	6.65	a
		Intermedia	8.40	a	8.60	a	8.67	a
		Finale	7.20	a	7.53	a	7.27	a
SOLIDI SOLUBILI	°BRIX	Iniziale	5.40	b	6.08	a	6.07	a
		Intermedia	6.18	a	6.48	a	6.10	a
		Finale	7.65	b	7.48	b	8.45	a
ACIDITA' TITOLABILE	mmol/H/l	Iniziale	151.67	a	147.00	a	147.33	a
		Intermedia	124.67	a	134.00	a	130.83	a
		Finale	118.67	a	114.33	a	115.00	a
GLUCOSIO	gr/l	Iniziale	14.33	a	14.28	a	13.25	a
		Intermedia	20.25	a	18.23	a	16.55	a
		Finale	20.03	a	22.23	a	23.20	a
FRUTTOSIO	gr/l	Iniziale	16.17	a	13.39	a	15.51	a
		Intermedia	25.43	a	22.73	a	20.81	a
		Finale	21.83	a	23.33	a	24.13	a
ZUCCHERI TOTALI	gr/l	Iniziale	30.50	a	27.67	a	28.75	a
		Intermedia	45.67	a	40.97	a	37.36	a
		Finale	41.87	a	45.57	a	47.33	a
RESIDUO SECCO	%	Iniziale	5.93	b	7.78	a	7.72	a
		Intermedia	6.75	a	6.89	a	6.85	a
		Finale	7.72	a	7.69	a	8.15	a

Tab. 5.9 - Valeurs moyennes des analyses physico-chimiques des fruits échantillons des trois systèmes.

<sup>2</sup> Ces analyses ont été effectuées par le Laboratoire Agroalimentaire-Environnemental dei Catane (L.AG.AM.ESA-CT).

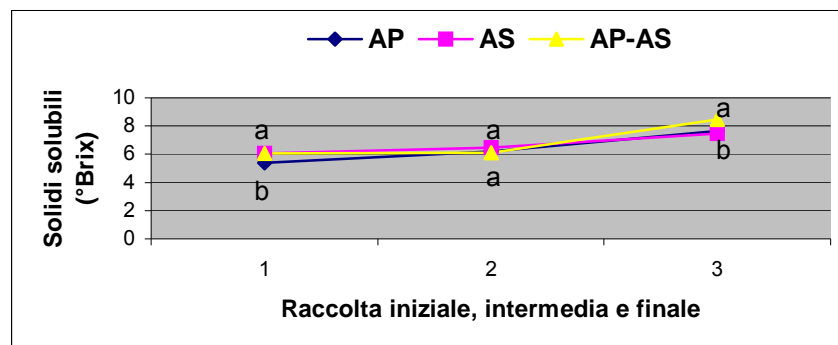


Fig. 5.22 - Teneur en solides solubles des fruits échantillons.

Les données collectées ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) et, en cas de données significatives, il a été appliqué le test par comparaisons multiples (séparation des moyennes) de Student-Neuman-Keuls (SNK). Ces procédures statistiques permettent de déduire que la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation n'a pas d'effets particuliers sur la production des cinq premières récoltes, alors que l'influence devient significative sur la production cumulée à partir de 134-152 et 158-167 jours après le repiquage (Fig. 5.19). Notamment, la production cumulée totale à la fin de la période de récolte a été nettement plus élevée pour le système arrosé à l'eau de pluie par rapport au système arrosé à l'eau saumâtre et au système mixte. Il n'existe par contre aucune différence significative entre ces deux derniers systèmes pendant toute la période de récolte. Le poids moyen des fruits récoltés dans le système arrosé à l'eau de pluie est aussi particulièrement plus élevé par rapport aux deux autres systèmes qui ne montrent que de légères différences entre eux (Fig. 5.20). Il est à noter que, dans les trois systèmes, le poids moyen des fruits est plus élevé en début de période de récolte et diminue progressivement jusqu'à la dernière récolte. Concernant le nombre moyen cumulé de fruits, pendant toute la période de collecte, on ne note que quelques différences significatives du nombre moyen de fruits du système arrosé à l'eau saumâtre par rapport aux deux autres, notamment à 104, 144 et 164 jours après le repiquage (Fig. 5.21). Au niveau des analyses physico-chimiques, l'analyse des

résultats n'a pas mis en évidence de différences particulières entre les trois systèmes quant à : la consistance, l'acidité titrable, le glucose, le fructose et le résidu sec, alors que pour les solides solubles totaux, le système à eau de pluie présente une différence significative (valeurs plus basses) lors de la récolte initiale par rapport au système à l'eau saumâtre, toutefois non significative par rapport au système mixte. Dans la récolte intermédiaire, il n'existe aucune différence significative entre les trois systèmes alors que dans la récolte finale, le système mixte présente une différence significative par rapport aux deux autres, entre lesquels la différence n'est toutefois pas significative (Fig. 5.22).

### ***Melon***

Les résultats de la production quantitative, en termes de poids total de fruits récoltés (Fig. 5.23) sur chaque parcelle (500 m<sup>2</sup>) pour chaque système sont indiqués dans le Tableau 5.10 et en Figure 5.24. Le poids moyen des 10 fruits échantillons pour chacune des trois répliques de chaque système précédemment décrites sont indiqués dans le Tableau 5.11 et en Figure 5.25. Les caractéristiques des fruits échantillons de melon des trois systèmes et des répliques correspondantes soumises à analyses qualitatives sont indiquées dans le Tableau 5.12. Le Tableau 5.13 indique par contre les valeurs moyennes des caractéristiques qualitatives de chaque système, de l'ANOVA et des *tests* SNK effectués.



Fig. 5.23 - Fruits échantillons à analyser.

TESI	Qli/500m <sup>2</sup>
AP	14
AS	11
AP-AS	13

Tab. 5.10 - Production globale de melon.

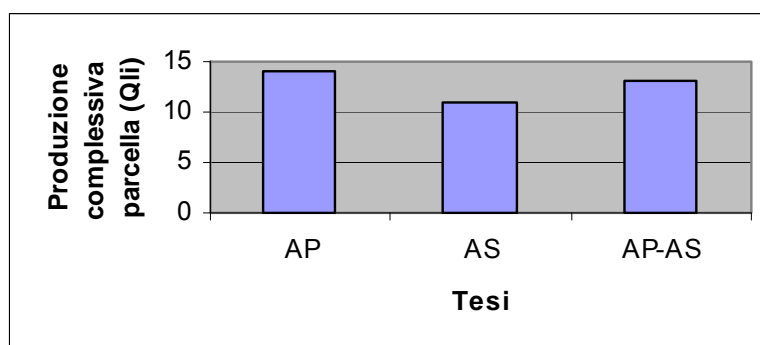


Fig. 5.24 - Production globale de melon.

Tesi/Repliche	1	2	3	Totale
AP	2.285	2.245	1.516	6.046
AS	1.273	1.925	1.075	4.273
AP-AS	1.595	1.53	1.782	4.907

Tab. 5.11 - Poids moyen des 10 fruits échantillons pesés (kg).

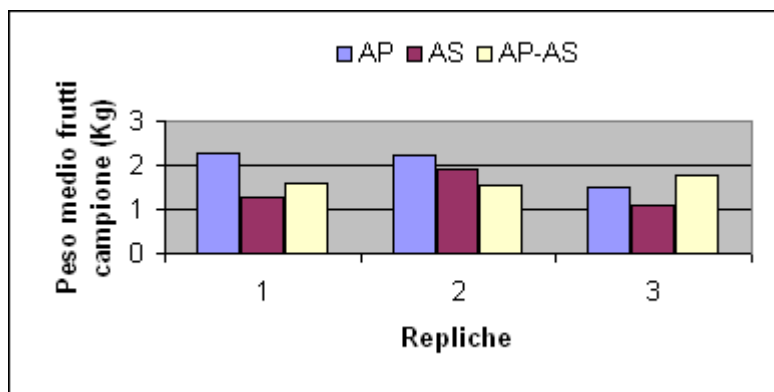


Fig. 5.25 - Poids moyen des 10 fruits échantillons pesés (kg).

Caratteristiche/Tesi	Acqua Piovana (AP)				Acqua Salmastra (AS)				Mista (AP-AS)			
	Repliche				Repliche				Repliche			
	1	2	3	Media	1	2	3	Media	1	2	3	Media
Peso fresco (g)	2236	2195	1473	<b>1968.0</b>	1845.0	1029.0	1209.0	<b>1361.0</b>	1706.0	1477.0	1529.0	<b>1570.7</b>
Lunghezza frutto (cm)	17.8	17.9	14.2	<b>16.6</b>	15.8	12.5	13.9	<b>14.1</b>	15.8	14.6	15.3	<b>15.2</b>
Larghezza frutto (cm)	15.5	15.7	13.9	<b>15.03</b>	15.1	12.7	13.6	<b>13.8</b>	15.3	14.7	13.7	<b>14.6</b>
Spessore epicarpo (cm)	0.6	0.4	0.5	<b>0.50</b>	0.7	0.5	0.3	<b>0.5</b>	0.4	0.4	0.3	<b>0.4</b>
Spessore polpa media (cm)	4.2	4.5	3.8	<b>4.1</b>	2.8	2.7	3.2	<b>2.9</b>	3.5	3.1	4.3	<b>3.6</b>
Lunghezza cavità (cm)	11.8	12.2	9.2	<b>11.1</b>	11.7	8.5	9.0	<b>9.7</b>	11.2	9.7	9.2	<b>10.0</b>
Larghezza cavità (cm)	6.6	7.1	6.2	<b>6.6</b>	8.5	7.3	6.7	<b>7.5</b>	8.2	7.9	4.5	<b>6.9</b>
Indice rifrattometrico (°Brix)	14.44	13.42	13.52	<b>13.8</b>	14.3	15.4	15.2	<b>15.0</b>	14.2	13.9	14.9	<b>14.3</b>
Sostanza secca (%)	14.59	13.66	12.92	<b>13.7</b>	14.1	14.9	14.9	<b>14.6</b>	13.8	14.4	14.6	<b>14.3</b>

Peso secco (g)	326.29	299.76	190.26	<b>272.1</b>	259.7	153.5	180.7	<b>198.0</b>	235.9	212.8	223.3	<b>224.0</b>
Colore epicarpo L*	60.65	59.38	59.59	<b>59.9</b>	60.1	59.6	57.7	<b>59.1</b>	59.0	59.6	64.7	<b>61.1</b>
Colore epicarpo a*	1.07	0.62	1.27	<b>1.0</b>	0.4	2.0	2.8	<b>1.7</b>	-0.8	0.6	2.3	<b>0.7</b>
Colore epicarpo b*	18.22	18.44	14.96	<b>17.2</b>	18.04	20.56	17.32	<b>18.6</b>	19.4	14.67	18.1	<b>17.4</b>
Colore polpa L*	53.48	53.04	61.56	<b>56.0</b>	55.16	59.26	56.98	<b>57.1</b>	58.7	57.29	60.95	<b>58.97</b>
Colore polpa a*	12.03	11.99	13.65	<b>12.6</b>	12.72	11.82	11.06	<b>11.89</b>	14.6	15.38	14.49	<b>14.83</b>
Colore polpa b*	26.76	24.2	29.95	<b>21.0</b>	25.49	26.57	23.53	<b>25.2</b>	31.5	31.96	31.04	<b>31.50</b>

Tab. 5.12 - Caractéristiques qualitatives des fruits échantillons de melon.

<b>Caratteristiche<sup>3</sup>/Tesi</b>	<b>Acqua Piovana (AP)</b>	<b>Acqua Salmastra</b>	<b>Mista (AP-AS)</b>
	<b>(AS)</b>		
Peso fresco (g)	1968,0 a	1361,0 a	1570,7 a
Peso secco (g)	272,1 a	198,0 a	224,0 a
Sostanza secca (%)	13,7 a	14,6 a	14,3 a
Lunghezza Frutto (cm)	16,6 a	14,1a	15,2a
Larghezza frutto (cm)	15,0a	13,8a	14,6a
Spessore epicarpo (cm)	0,5 a	0,5 a	0,4 a
Spessore polpa (cm)	4,1b	2,9a	3,6ab
Lunghezza cavità (cm)	11,1a	9,7a	10,0a
Larghezza cavità (cm)	6,6a	7,5a	6,9a
Indice rifrattometrico (° Brix)	13,8a	15,0a	14,3a
Colore epicarpo L*	59,9a	59,1a	61,1a
Colore epicarpo a*	1,0a	1,7a	0,7a
Colore epicarpo b*	17,2a	18,6a	17,4a

<sup>3</sup> Media dei valori delle tre ripetizioni.



Colore polpa L*	56,0a	57,1a	59,0a
Colore polpa a*	12,6a	11,9a	14,8b
Colore polpa b*	27,0a	25,2a	31,5b

Tab. 5.13 - *Test* statistique SNK des caractéristiques qualitatives des fruits échantillons de melon.

Les résultats exposés ci-dessus permettent de déduire que, comme pour la tomate, pour le melon le système arrosé à l'eau de pluie a connu la plus forte production mais les différences ne sont pas significatives. Concernant en revanche le système mixte (EP-ES), contrairement à la tomate, la production a une valeur intermédiaire, entre le système arrosé à l'eau de pluie (EP) et celui arrosé à l'eau saumâtre (ES). Pour le melon, ce dernier a connu la plus basse production. Les poids moyens des fruits ont connu la même évolution. Concernant les caractéristiques qualitatives des fruits, il a été déterminé : le poids frais et sec, la matière sèche, la longueur et la largeur du fruit, l'épaisseur de l'écorce et de la pulpe, la longueur et la largeur de la cavité, la couleur de l'écorce et de la pulpe et l'indice de réfraction en degrés Brix. Toutefois, les différences entre les trois systèmes se sont avérées très modestes et pratiquement jamais significatives sur l'analyse de la variance (*Test* de Student-Newman-Keuls,  $P=0,05$ ). Les seules différences significatives se trouvent au niveau de l'épaisseur de la pulpe et des paramètres chromatiques de la pulpe (Tab. 5.13), au composant a (axe vert-rouge) et b (axe jaune-bleu). Même avec les limites indiquées ci-dessus (par le nombre des répliques et par la nécessité d'une récolte anticipée des fruits), les résultats pour le poids frais, le poids sec et l'épaisseur de la pulpe donnent une indication positive pour le système arrosé à l'eau de pluie. Pour l'indice de réfraction (qui représente la teneur en sucres) par contre, comme pour la tomate, les résultats indiquent une valeur plus élevée pour le système arrosé à l'eau saumâtre.

## 5.4 Conclusions

Les résultats qui viennent d'être exposés permettent de tirer les conclusions qui suivent.

- La méthode de l'exploitation, d'alterner de l'eau saumâtre et de l'eau de pluie lors des arrosages, représente une mesure de mitigation des effets de l'irrigation exclusivement à l'eau saumâtre, mais est liée à la capacité de l'exploitation de collecter et de stocker l'eau de pluie;
- L'utilisation de l'eau de pluie, collectée depuis les toits des serres à usage d'irrigation peut être considérée comme la meilleure technique de développement et d'optimisation de la production de certaines cultures horticoles, même si cette technique dépend des conditions climatiques de la zone et notamment de la pluviométrie de l'année;
- L'enquête effectuée peut être considérée comme positive et il serait opportun de la poursuivre avec des moyens financiers suffisants pour adopter un schéma d'expérimentation plus rigoureux.

Nous remercions M. Giuseppe Cammilleri, propriétaire de l'exploitation qui a permis de réaliser l'enquête expérimentale, en collaborant avec un grand enthousiasme et une exquise disponibilité.

Nous remercions le Pr G. Restuccia et le Pr L. Cosentino du Département de Sciences Agronomiques Agrochimiques et Productions Animales (DACPA) - Sect. Sciences Agronomiques, Université des Études de Catane,

Nous remercions le Pr G. La Malfa, Madame le Pr D. Romano et M. Argento du Département d'Horto-Floro-Arboreticulture et Technologies Agroalimentaires (DOFATA) - Sect. Horto-floriculture, Université des Études de Catane, pour les analyses effectuées sur les caractéristiques qualitatives des fruits échantillons de melon et pour les élaborations statistiques effectuées dans cette Section.

## ***Chapitre 6 - Rôle du boisement dans la mitigation des processus de désertification***

***Pr F. Maetzke***

***Département de Cultures Arboricoles - DCA, Université des Études de Palerme***

### **6.1. ZONE D'ÉTUDE**

Le bassin hydrographique de l'Imera méridional, ou Salso représente le deuxième cours d'eau de la Sicile, tant par l'amplitude du bassin que par la longueur du bras principal. Il se situe dans la portion centrale du versant méridional de l'île et a une forme allongée du Nord au Sud, occupant une superficie totale peu supérieure à 2000 km<sup>2</sup> (Fig. 6.1). Il est limitrophe à l'Est avec les bassins hydrographiques des fleuves Simeto et Gela, à l'Ouest avec le bassin du Platani, du Naro et du Palma, au Nord avec ceux de l'Imera septentrional et du Pollina.

D'un point de vue administratif, le bassin de l'Imera méridional s'étend dans les terres des provinces d'Agrigente, Caltanissetta, Enna et Palerme, alors qu'il comprend, en partie ou en totalité, 23 agglomérations : Campobello di Licata, Licata, Ravanusa, Caltanissetta, Delia, Mazzarino, Riesi, Resuttano, San Cataldo, Santa Caterina Villarmosa, Barrafranca, Calascibetta, Enna, Pietraperzia, Villarosa, Alimena, Blufi, Bompietro, Castellana Sicula, Gangi, Petralia Soprana et Petralia Sottana (Fig. 6.2).



Fig. 6.1 - Localisation géographique du Fleuve Imera méridional.

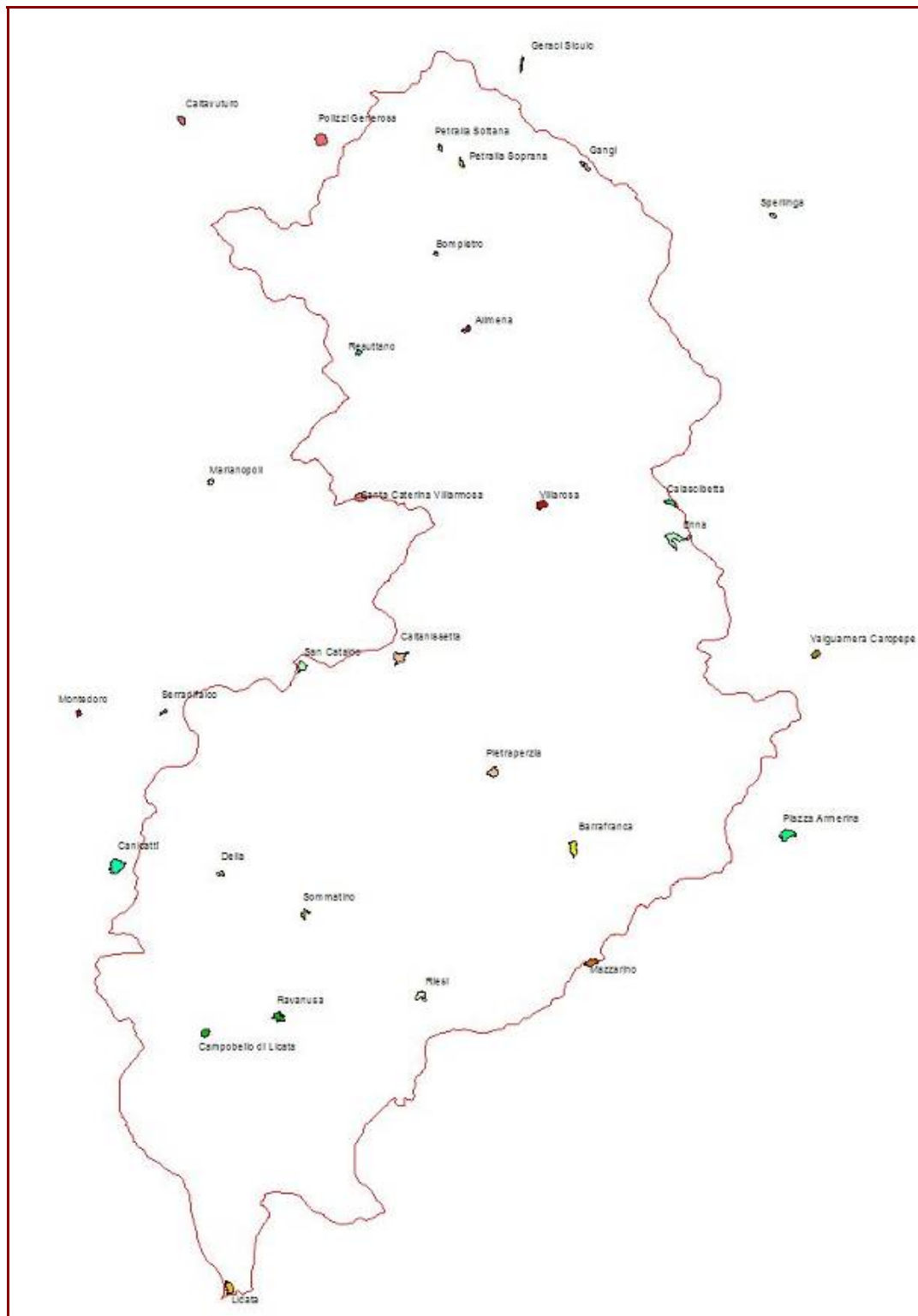


Fig. 6.2 -. Localisation des agglomérations au sein et autour du bassin du fleuve Imera méridional.

On trouve à l'intérieur du bassin les barrages Morello, Olivo et Gibbesi qui proviennent respectivement du barrage du fleuve Morello, du Torrent Olivo et du Fleuve Gibbesi. Il existe aussi 4 zones minières pour l'exploitation de sels de potasse désormais abandonnées : S. Caterina I, Corvillo, Sambuco - Casazze et Pasquasia.

Le bassin comprend aussi de nombreuses zones protégées entre réserves régionales, sites Nature 2000 et une partie du Parc des Madonie : dans la province de Caltanissetta, la R.N.O. Monte Capodarso et Vallée de l'Imera, R.N.I. géologique de C.da Scalera et les S.I.C. C.da Caprara, Monte Capodarso et Vallée de l'Imera, T. Vaccarizzo; dans la province d'Enna, la R.N.O. Monte Altesina, R.N.O. Rossomanno - Grottascura Bellia et le S.I.C. V.ne Rossomanno - Forêts de Piazza Armerina - Serres de Monte Cannarella - Monte Altesina ; dans la province de Palerme, le Parc des Madonie, les S.I.C. Complexe des calanques de Castellana Sicula - Monte San Calogero (Gangi) - Rocche di Entella - Monte San Salvatore, Monte Catarineci et Vallon Mandarinini (Fig. 6.3).

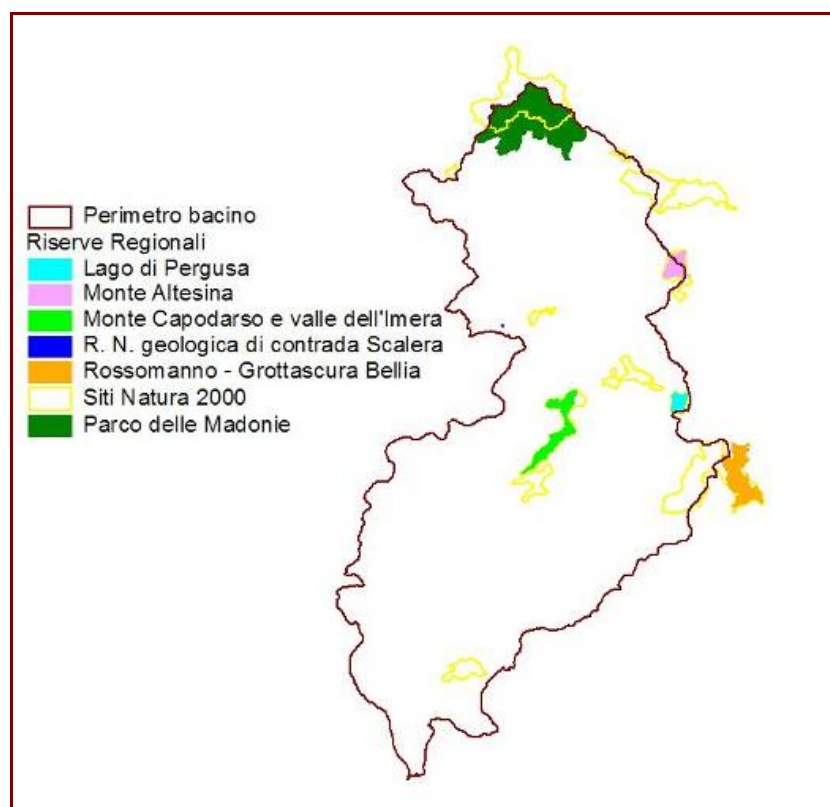


Fig. 6.3 - Localisation des zones protégées à l'intérieur du bassin.

L'analyse et l'interprétation des caractéristiques d'utilisation du sol de la zone étudiée ont été réalisées à l'aide du système européen de classification du sol *Corine Land Cover* approfondi au 4<sup>ème</sup> niveau. Les paysages sont typiques de la colline intérieure sicilienne où dominent les champs cultivés (froment, légumes secs et plantes fourragères diverses) qui occupent les sols à matrice à prédominance argileuse, où bien souvent la réserve en eau fait défaut, sur une superficie légèrement supérieure à 110 000 hectares, soit 55% de la superficie totale du bassin. On trouve sur des surfaces limitées, surtout à proximité des agglomérations, des oliveraies et des amanderaies souvent associées à des caroubiers, figuiers et pistachiers. La vigne en culture spécialisée domine sur segment terminal du bassin, alors que les cultures d'arbres fruitiers mixtes sont plus répandues (olivier-amandier, vigne-olivier). À l'Est de la plaine de Licata se trouve une zone d'irrigation étendue destinée à la culture d'espèces horticoles (poivrons, tomates, courgettes, etc.) en culture protégée (tunnels et serres), alors que lesdites mosaïques culturales, zones destinées à des cultures diverses à type de potagers domestiques, plantées d'arbres et de légumes, sont disséminées sur toute la superficie du bassin. Dans des cadres très limités, en revanche, concentrés sur des substrats plutôt arides (parois rocheuses, petites avancées bien exposées, versants abrupts à forte érosion, etc.) se trouvent les espèces typiques de la garrigue et du maquis méditerranéen comme l'ampelodesma, le laurier-rose, l'euphorbe, l'asphodèle, le thym, le ciste, le palmier nain, l'olivier sauvage, l'égphantier, etc. Les aires de pâturages représentent par contre près de 10% de la superficie totale du bassin.

Les bois sont très limités, souvent fortement dégradés et occupent une surface légèrement supérieure à 5000 hectares (environ 2.5%) : il s'agit essentiellement de forêts à prédominance de chênes à feuillage persistant (chêne vert, chêne-liège) ou d'autres feuillus (chêne pubescent, eucalyptus, etc.) et de plantations de reboisement à prédominance de conifères (pins méditerranéens, cyprès, etc.). On trouve enfin, surtout dans la partie centre-sud du bassin, des plantations de noyers, cerisiers,

robiniers, oliviers d'Afrique, etc. à des fins de production, résultat de l'activité de boisement encouragée et financée par la Communauté Européenne.

Il faut enfin citer les calanques, dépourvues de végétation en raison de la forte activité d'érosion qu'elles subissent et la végétation riveraine qui se développe près des cours d'eau et des zones humides. Pour finir, le tableau 6.1 indique la classification du territoire du bassin à l'échelle 1:100000 dans les classes de légende CLC et leur répartition en termes de superficie comme de pourcentage.

CLC		Superficie	
		ha	%
Insedimento continuo	111	2193.90	1.08
Insedimento discontinuo	112	1413.66	0.70
Insedimento industriale, commerciale	121	282.69	0.14
Aree portuali	123	4.43	0.00
Aree estrattive	131	421.28	0.21
Aree ricreative e sportive	142	34.88	0.02
<b>Totale</b>		<b>4350.84</b>	<b>2.14</b>
Vigneti	221	6324.55	3.12
Frutteti	222	398.75	0.20
Oliveti	223	13383.99	6.59
Colture temporanee associate colture permanenti	241	5525.61	2.72
Sistemi colturali e particellari complessi	242	9847.30	4.85
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie	243	3555.03	1.75
Colture intensive	2111	106928.10	52.67
Colture estensive	2112	3474.35	1.71
<b>Totale</b>		<b>149437.66</b>	<b>73.60</b>
Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	332	487.62	0.24
Aree con vegetazione rada	333	1274.66	0.63
<b>Totale</b>		<b>1762.28</b>	<b>0.87</b>
Brughiere e cespuglieti	322	6178.48	3.04
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva	324	539.80	0.27
Boschi a prevalenza di querce e altre latifoglie sempreverdi	3111	2725.81	1.34
Boschi a prevalenza di querce caducifoglie	3112	426.85	0.21
Boschi a prevalenza di castagno	3114	109.62	0.05
Boschi a prevalenza di faggio	3115	141.21	0.07
Boschi ed ex piantagioni di latifoglie esotiche	3117	3947.35	1.94
Boschi a prevalenza di pini mediterranei e cipressi	3121	175.14	0.09
Boschi ed ex piantagioni di conifere esotiche	3125	32.77	0.02
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce sempreverdi	31311	43.54	0.02
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini e cipressi	31321	214.38	0.11
<b>Totale</b>		<b>14534.95</b>	<b>7.16</b>



CLC		Superficie	
		ha	%
Praterie continue	3211	16419.31	8.09
Praterie discontinue	3212	4872.32	2.40
<b>Totale</b>		<b>21291.62</b>	<b>10.49</b>
Macchia alta	3231	2109.58	1.04
Macchia bassa e garighe	3232	9267.81	4.56
<b>Totale</b>		<b>11377.39</b>	<b>5.60</b>
Bacini d'acqua	512	271.85	0.13
<b>Totale</b>		<b>203026.58</b>	<b>100.00</b>

Tab. 6.1 - Classes d'utilisation du sol selon la classification CLC et surfaces occupées du bassin de l'Imera méridional à l'échelle 1:100000.

## 6.2 RESSOURCES FORESTIÈRES À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE ÉTUDIÉE

Les ressources forestières du bassin de l'Imera méridional sont, comme évoqué, plutôt limitées et s'étendent sur une surface d'un peu plus de 5000 hectares, soit environ 2.5% de la superficie totale. La zone comprend toutefois de nombreuses aires naturelles protégées, dont une portion du Parc Régional des Madonie, diverses réserves naturelles, des Sites d'Importance Communautaires - SIC (Directive Habitat 92/43/EEC, adoptée en Italie par la loi 357/97) et des Zones de Protection Spéciales - ZPS (Directive Oiseaux 79/409/EEC, adoptée en Italie par la loi 157/92).

L'analyse des zones protégées et du patrimoine forestier qu'on y trouve actuellement a été réalisée à l'aide du système européen de classification du sol Corine Land Cover approfondi au 4<sup>ème</sup> niveau.

Le versant méridional des Madonie est la ligne de partage des eaux septentrionale du bassin ainsi que la source de l'Imera méridional (Fig. 6.4).

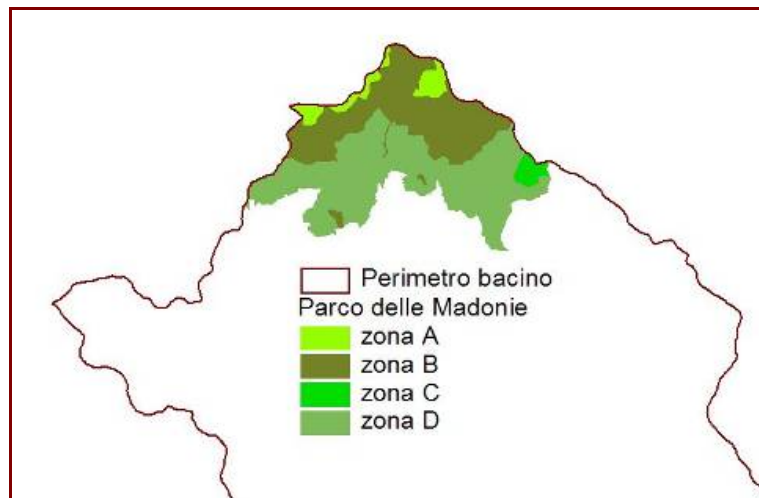


Fig. 6.4 - Localisation du Parc des Madonie et zonage du parc.

Dans cette portion du parc prédominent les espèces de végétation telles que l'olivier sauvage, l'euphorbe, l'églaïer, la fêrue, l'ampelodesma, le laurier-rose, l'orchidée, les prairies entrecoupées de forêts à prédominance de chênes à feuillage persistant comme le chêne-liège et le chêne vert mais aussi, sporadiquement, des chênaies à feuillage caduque comme le chêne pubescent et des fourrés. Sur l'extrémité septentrionale du bassin, à une altitude supérieure à 1800 m, se trouvent par contre les hêtraies (Fig. 6.5).

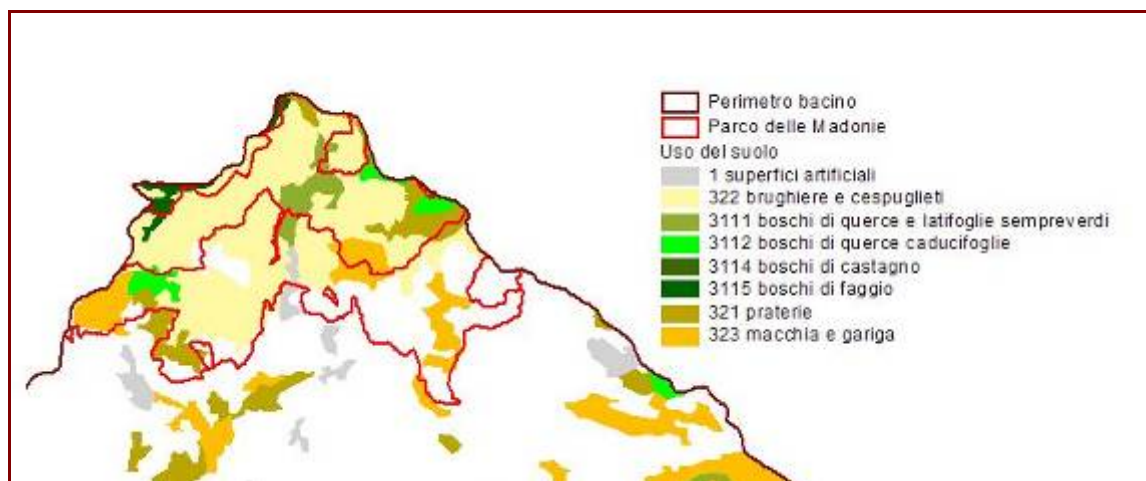


Fig. 6.5 - Utilisation du sol du Parc des Madonie.

Dans le centre du bassin se situent par contre les réserves naturelles ci-après :

- R.N.O “Monte Altesina” créée en 1997, elle s’inscrit dans les territoires communaux de Nicosia et Leonforte (EN) et est gérée par l’*Azienda Foreste Demaniali* (Organisme Forêts Domaniales) ;
- R.N.I géologique de “Contrada Scalera” créée en 1997, qui s’inscrit dans la commune de Santa Caterina Villarmosa (CL) et est gérée par la province de Caltanissetta;
- R.N.O “Monte Capodarso e Valle dell’Imera” créée en 1999, qui s’inscrit dans les territoires communaux de Caltanissetta, Enna et Pietraperzia et est gérée par Italia Nostra;
- R.N.S “Lago di Pergusa” créée en 1995, qui s’inscrit dans la commune d’Enna et est gérée par la province d’Enna;
- R.N.O “Rossomanno - Grottascura Bellia” créée en 2000, qui s’inscrit dans les territoires communaux d’Enna, Piazza Armerina et Aidone et est gérée par l’Administration FF.DD.

L’analyse des classes d’utilisation du sol *Corine Land Cover*, définit un cadre de végétation assez pauvre. Les formations forestières de plus grand intérêt se trouvent dans la R.N.O “Monte Altesina” (altitude 700 - 1200 m) où les bois à prédominance de chênes et de feuillus persistants (chêne vert, chêne-liège, etc.) s’alternent en formation de maquis bas et de garrigue ; concentrés en partie septentrionale et à l’extrémité méridionale de la R.N.O “Monte Capodarso e Valle dell’Imera” à une altitude de 600-800 m on retrouve des landes et des fourrés, des prairies continues, des zones à végétation de sclérophylles et d’espèces de maquis haut, des forêts et des anciennes plantations à prédominance de feuillus exotiques (robinier, ailante), la partie centrale (altitude 200-500 m) fait place aux cultures intensives et extensives, aux oliveraies et aux zones à végétation buissonnière et forestière ; il faut citer les forêts et les ex-plantations à prédominance de conifères exotiques, plus développées en partie méridionale (à une altitude de 600-800 m) de la R.N.S “Lago di Pergusa” (Fig. 6.6).

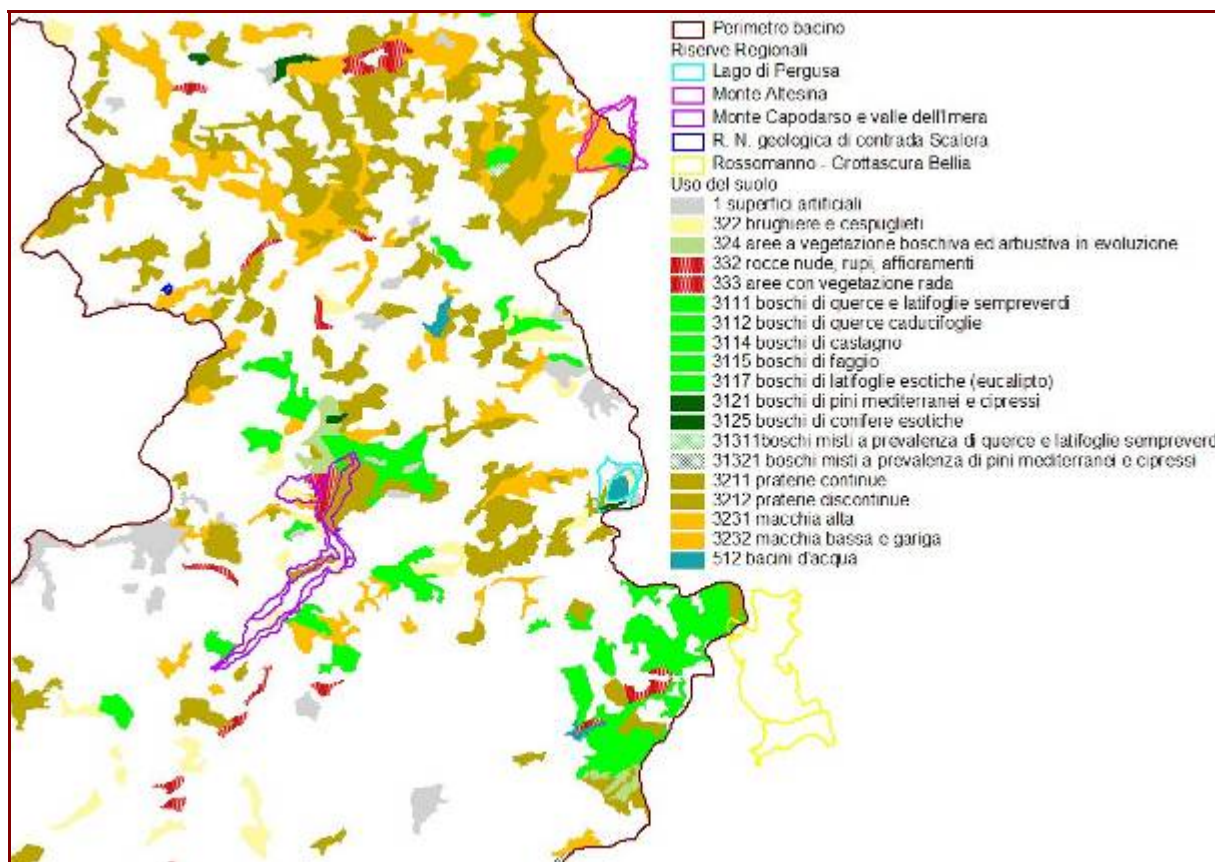


Fig. 6.6 - Localisation et utilisation du sol des Réserves Naturelles s'inscrivant dans le bassin.

Aux zones naturelles protégées ci-dessus viennent s'ajouter les Sites Natura 2000 (SIC et ZPS) (Fig. 6.7):

- SIC "Monte S.Salvatore, M. Catarineci, V.ne Mandarinini, Ambienti Umidi" d'une superficie de près de 5700 hectares, s'inscrivant dans les territoires communaux de Petralia Soprana, Petralia Sottana, Gangi, Polizzi Generosa et Castellana Sicula;
- SIC "Monti di Piazza Armerina" d'une superficie de 4400 hectares et s'inscrivant dans les communes d'Enna, Aidone et Piazza Armerina;
- SIC "Pizzo Muculufa" d'une superficie de 798 hectares et s'inscrivant dans les communes de Ravanusa et Butera;

- SIC “Contrada Caprara” d’une superficie de près de 830 hectares et s’inscrivant dans le territoire communal de Pietraperzia;
- SIC “Monte Capodarso e Valle dell’Imera” d’une superficie de près de 1730 hectares et s’inscrivant dans les communes d’Enna, Caltanissetta et Pietraperzia;
- SIC “Serres de M. Cannarella” d’une superficie de près de 910 hectares et s’inscrivant dans la commune d’Enna;
- SIC “Torrente Vaccarizzo” d’une superficie de près de 190 hectares et s’inscrivant dans les communes d’Alimena et Santa Caterina Villarmosa;
- SIC “M. Altesina” d’une superficie de 1140 hectares et s’inscrivant dans les communes de Nicosia, Leonforte et Calascibetta;
- SIC “M. S.Calogero” d’une superficie de 1770 hectares et s’inscrivant dans les communes de Gangi et Sperlinga;
- SIC “Bosco di Sperlinga, Alto Salso” d’une superficie de 1760 hectares et s’inscrivant dans les communes de Sperlinga et Nicosia;
- SIC “Rocche di Entella” d’une superficie de 195 hectares et s’inscrivant dans la commune de Gangi;
- SIC “Complexe des Calanques de Castellana Sicula” d’une superficie de près de 140 hectares et s’inscrivant dans la même commune;
- ZPS “Lago di Pergusa” d’une superficie de près de 430 hectares s’inscrivant dans la commune d’Enna.

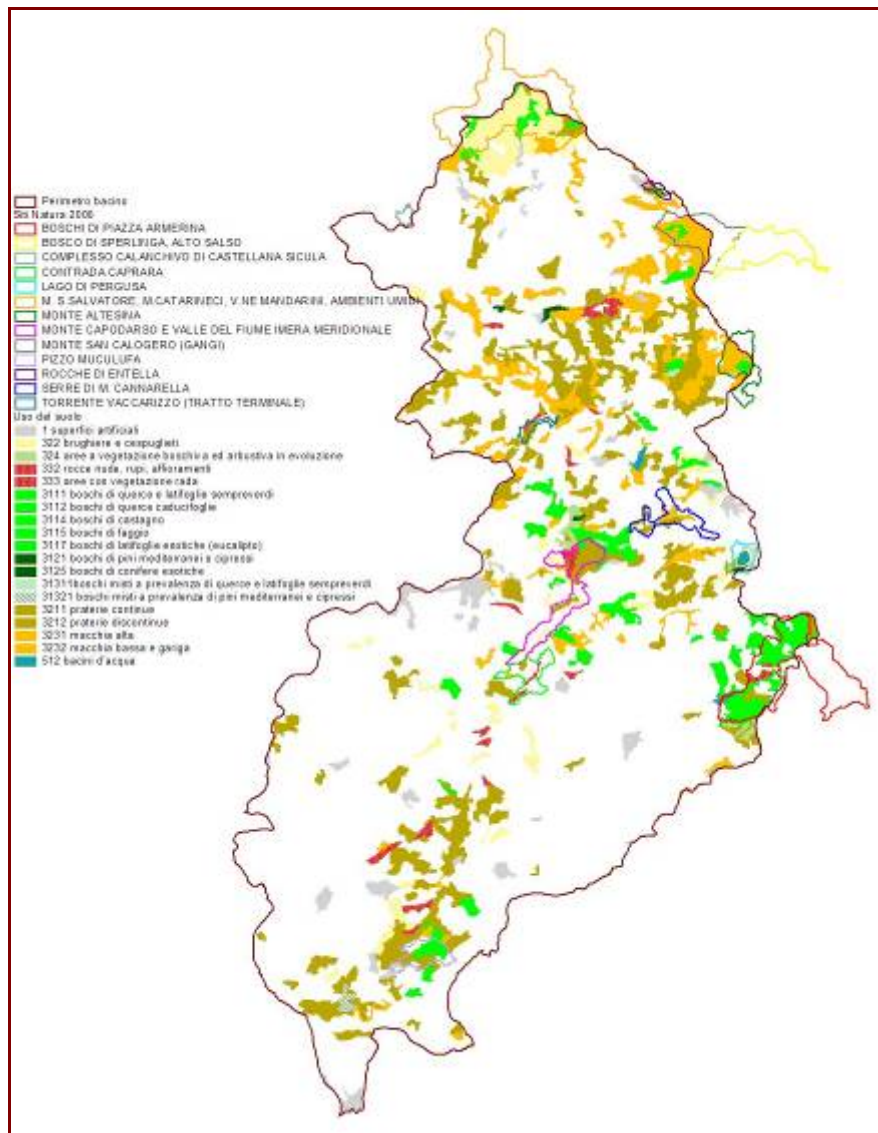


Fig. 6.7 - Localisation et utilisation du sol des Sites Natura 2000 à l'intérieur du bassin.

Ces bases de connaissance représentent le premier cadre des ressources forestières au sein du bassin étudié, l'ensemble des zones forestières et préforestières tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des zones protégées, qui feront l'objet d'enquêtes ultérieures plus détaillées sur la composition, la structure et les fonctions des systèmes forestiers.

## 6.3 Résultats

Conformément aux objectifs de cette étude et à ce qui a été défini plus haut, le chapitre suivant présente la carte de l'utilisation du sol du territoire du bassin du Fleuve Imera méridional à l'échelle 1:25.000 dérivant de l'activité de mise en œuvre de cette dernière à l'échelle 1:100.000 avec analyse détaillée des principaux systèmes forestiers et préforestiers s'inscrivant dans ce bassin. Enfin, une série de lignes d'intervention et de gestion en vue d'une augmentation de leur biodiversité, d'une gestion durable et de la mitigation des phénomènes de désertification est formulée pour ces ressources.

### 6.3.1 Carte de l'utilisation du sol à l'échelle 1:25.000

L'activité de photo-interprétation a permis de délimiter, de localiser géographiquement, de classer l'utilisation du sol et d'estimer les secteurs concernés par les différentes unités de compartimentage ainsi que la stratification des formations forestières et préforestières, selon le système de classification européen *Corine Land Cover* approfondi au IV et V niveau hiérarchique (Annexe 6.1). Un tableau synthétique de la classification du territoire du bassin dans les classes de légende CLC et leur répartition surfacique est indiqué ci-après (Tab. 6.2).

<i>CLC</i>		<i>Superficie</i>	
		<i>ha</i>	<i>%</i>
Insedimento continuo	111	1719.1	0.793
Insedimento discontinuo	112	2056.2	0.948
Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati	121	296.2	0.137
Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche	122	6.3	0.003
Aree portuali	123	8.0	0.004
Aree estrattive	131	136.1	0.063
Aree ricreative e sportive	142	9.7	0.004
<b>Totale</b>		<b>4231.5</b>	<b>1.95</b>
Colture intensive	2111	88465.0	40.798
Colture estensive	2112	20804.9	9.595
Seminativi in aree irrigue	212	72.8	0.034
Vigneti	221	5682.0	2.620

<i>CLC</i>		<i>Superficie</i>	
		<i>ha</i>	<i>%</i>
Frutteti	222	209.9	0.097
Oliveti	223	10178.6	4.694
Colture temporanee associate a colture permanenti	241	5027.2	2.318
Sistemi colturali e particellari complessi	242	24578.5	11.335
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con spazi naturali importanti	243	4273.9	1.971
Aree agroforestali	244	291.1	0.134
<b>Totale</b>		<b>159583.8</b>	<b>73.6</b>
Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	332	47.4	0.022
Aree con vegetazione rada o assente	333	2229.2	1.028
<b>Totale</b>		<b>2276.6</b>	<b>1.05</b>
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	324	2410.1	1.111
Arbusteti termofili	3222	15711.1	7.246
Boschi a prevalenze di querce e altre latifoglie sempreverdi	3111	506.7	0.234
Boschi a prevalenze di querce caducifoglie	3112	444.9	0.205
Boschi a prevalenza di castagno	3114	48.7	0.022
Boschi a prevalenza di faggio	3115	197.6	0.091
Boschi ed ex piantagioni di latifoglie esotiche	3117	5364.9	2.474
Boschi a prevalenza di pini mediterranei e cipressi	3121	729.0	0.336
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di latifoglie esotiche	31317	1941.5	0.895
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini mediterranei e cipressi	31321	678.8	0.313
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani	31322	110.3	0.051
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di conifere esotiche	31325	36.2	0.017
<b>Totale</b>		<b>28179.6</b>	<b>13.00</b>
Praterie continue	3211	14061.0	6.485
Praterie discontinue	3212	7348.5	3.389
<b>Totale</b>		<b>21409.5</b>	<b>9.87</b>
Corsi d'acqua, canali e idrovie	511	897.1	0.414
Bacini d'acqua	512	236.7	0.109
Mari (foce del Fiume Imera meridionale)	523	20.9	0.010
<b>Totale</b>		<b>216835.7</b>	<b>100.00</b>

Tab. 6.2 - Classes d'utilisation du sol selon la classification CLC et surfaces correspondantes occupées du bassin de l'Imera méridional à l'échelle 1:25000.

L'analyse des données montre la façon dont la zone la plus étendue est identifiée par les zones agricoles qui s'étendent largement sur plus de la moitié de la superficie totale du bassin (73.6%) et se situent principalement dans sa portion méridionale et centro-septentrionale (Annexe 6.2). Il s'agit pour une bonne partie des paysages typiques de la colline intérieure sicilienne où dominant les cultures en zones



non irriguées (froment, légumes secs et cultures fourragères diverses) qui occupent les terrains à matrice essentiellement argileuse sur une surface légèrement inférieure à 110 000 hectares, soit 50% de la superficie totale du bassin (Fig. 6.8). La partie restante présente sur des surfaces limitées, surtout à proximité des agglomérations, des oliveraies et des amanderaies souvent associées à des caroubiers, figuiers et pistachiers. La vigne en culture spécialisée domine sur segment terminal du bassin, alors que les cultures d'arbres fruitiers mixtes sont plus répandues (olivier-amandier, vigne-olivier). La partie terminale du bassin, au niveau de la vaste zone irriguée qu'est la plaine de Licata, se destine par contre à la culture essentiellement horticole (poivrons, tomates, courgettes, etc.) en culture protégée (tunnels et serres). Il existe enfin, de façon disséminée sur toute la superficie du bassin et notamment à proximité des agglomérations, lesdites mosaïques culturales ou systèmes cultureux et parcellaires complexes (11.3%), à savoir des zones destinées à des cultures diverses à type de potagers familiaux, plantés d'arbres et de légumes.



Fig. 6.8 - Paysage agricole typique de l'arrière-pays sicilien et de la matrice du paysage du bassin de l'Imera méridional.

Les zones forestières et préforestières sont plutôt limitées, elles s'étendent sur un peu plus de 28000 hectares, soit 13% de la superficie totale du bassin et se situent surtout au niveau des zones naturelles protégées, Parc Régional des Madonie, Réserves, SIC et ZPS (Annexe 6.3). La donnée la plus intéressante est la superficie couverte de fourrés thermophiles, estimée à plus de 15000 hectares (7.2%). Cette catégorie regroupe une grande partie de la végétation préforestière présente dans le bassin : les exemples typiques sont les massifs de couverture de *Crataegus* et *Rubus* sp. pl., *Spartium junceum*, *Calicotome infesta*, etc. et toutes les espèces de végétation riveraine, *Tamarix* sp. pl., *Nerium oleander*, *Salix* et *Populus* sp. pl., que l'on trouve le long de l'Imera méridional et des autres cours d'eau (ses affluents).

Les espèces typiquement forestières sont par contre dominées par les reboisements majoritairement de feuillus exotiques (eucalyptus) qui s'étendent sur plus de 5000 hectares, soit près de 2.5% de la surface totale du bassin, et par des associations de feuillus et de conifères à prédominance d'eucalyptus ou de pins méditerranéens (pin d'Alep, pin parasol) et de cyprès. Il s'agit de systèmes datant de l'après-guerre pour faire face à la nécessité de reboiser des zones à fort risque hydrogéologique. Le choix de ces espèces, très communes dans toute l'île, vient de leur capacité de coloniser des terrains austères (argileux et stériles), de la rapidité d'implantation et de pousse, des forts potentiels productifs supposés. Ceci a entraîné la propagation inconditionnée de ces espèces considérées comme peu exigeantes, productives et facilement adaptables à des environnements divers. Pour finir, les forêts à prédominance de chênes à feuillage persistant (chêne vert, chêne-liège), de chênes à feuillage caduque (chêne pubescent, rouvre), d'autres feuillus (châtaignier, hêtre) ou de conifères (pins méditerranéens, pins oroméditerranéens et de montagne, cyprès) couvrent une superficie très réduite (environ 1%) et se situent en grande partie au nord du bassin, entre les limites méridionales du Parc Régional des Madonie.

Les aires de pâturages représentent près de 10% de la superficie totale du bassin. Cette catégorie comprend les prairies d'*Ampelodesmos mauritanicus* que l'on trouve un peu dans tout le bassin et les prairies de *Lygeum spartum*, *Aster sorrentinii*, *Lavatera agrigentina* Tineo, *Limonium optima*, etc., qui poussent sur les sols peu

évolués des zones marno-argileuses de la série évaporitique sicilienne qui touchent la portion centro-méridionale du bassin. Il faut enfin citer les nombreuses zones de calanques et les sous-sols arides tels que les parois rocheuses, les petits promontoires bien exposés, les versants abrupts sujets à forte érosion qui représentent un peu plus de 1% de la superficie du bassin et sont généralement dépourvus de végétation.

En conclusion, la comparaison de la carte d'utilisation du sol du bassin du Fleuve Imera méridional à l'échelle 1:25.000 à la carte à l'échelle 1:100.000 (Annexe 6.4) a mis en évidence sur cette dernière un différentiel d'information globalement non négligeable tant au niveau de la classification du territoire dans les différentes classes de légende CLC que des répartitions surfaciques respectives. Les différences les plus sensibles ont notamment été constatées dans la classification des surfaces forestières et préforestières : la superficie globale est de 7.16% sur la carte à l'échelle 1:100.000 par rapport à 13% de la carte dérivée à l'échelle 1:25.000, de plus la classe 31317 (forêts mixtes de conifères et de feuillus à prédominance de feuillus exotiques) n'apparaît pas sur la première, atteignant près de 1% sur la deuxième, alors que les zones classées comme maquis et garrigue sur la carte à plus grande échelle ont été opportunément classées dans la catégorie des fourrés thermophiles dans la carte à plus petite échelle.

### **6.3.2 Caractérisation des peuplements forestiers et préforestiers**

Ce paragraphe présente une analyse détaillée sur les aspects environnementaux, structurels et administratifs des plus grands systèmes forestiers et préforestiers du bassin du fleuve Imera méridional dérivant de l'activité de détection effectuée sur site. Il est indiqué, notamment pour les systèmes principalement répandus (bois d'eucalyptus, pinèdes, forêts mixtes et d'arbustes thermophiles), une analyse approfondie sur les caractéristiques de répartition et les espèces qui les constituent, l'entité de la superficie couverte, les stations et les caractéristiques sylviculturales qui concernent aujourd'hui ces peuplements.

### 6.3.2.1 Forêts d'eucalyptus

L'introduction des eucalyptus à grande échelle en Sicile date de la deuxième moitié des années 50, suite au développement de certaines politiques forestières qui tendaient à privilégier, dans les opérations de boisement, l'utilisation d'espèces exotiques à croissance rapide. C'est entre les années 50 et 60 que furent réalisés les plus grands reboisements d'eucalyptus, principalement concentrés dans l'arrière-pays sicilien et en quantité non négligeable dans le bassin de l'Imera méridional et du Salso, entre les provinces d'Enna et de Caltanissetta, à des fins exclusives de protection et de conservation du sol.

La surface totale des forêts d'eucalyptus en formation pure dans le bassin de l'Imera méridional est légèrement supérieure à 5000 hectares, soit 2.5% de la superficie totale, essentiellement répartis dans la partie centro-méridionale du bassin. Les forêts d'eucalyptus pures sont formées d'une ou de plusieurs espèces, en général avec mélange pied à pied ou par groupes, mais avec une nette prédominance d'*Eucalyptus camaldulensis*, suivi d'*Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus occidentalis* et plus rarement d'*Eucalyptus gomphocephala* (Saporito, 1998). L'espèce la plus répandue dans les systèmes de reboisement est l'*Eucalyptus camaldulensis*. Cette importante diffusion est à mettre en relation avec la grande plasticité d'adaptation de l'espèce à des caractéristiques climatiques et des sols divers, en conditions souvent difficiles pour le reboisement et à la rapide couverture du sol. Cette plasticité et ce pouvoir d'enracinement ont entraîné sa large diffusion dans le cadre du reboisement de protection, dans des lieux très dégradés et à caractéristiques pédologiques difficiles.

Il en est ainsi, par exemple, pour les eucalyptus répandus dans la partie centrale du bassin entre les provinces de Caltanissetta et d'Enna, sur des substrats argileux, souvent à caractère vertique, d'épaisseur variable (fin, moyen et épais) dans une phase évolutive variable (érodée, phase calanque, saline). Dans ces conditions, les arbres ont pu s'enraciner mais s'avèrent peu vigoureux, ce qui se traduit par des résultats productifs très modestes. De ces peuplements l'*Eucalyptus camaldulensis* est

la seule espèce que l'on trouve dans la strate arborescente atteignant un degré de recouvrement plutôt élevé (60-80%) et ne parvient pas d'elle-même à amorcer un processus évolutif qui aboutisse à l'implantation d'une forme quelconque de prairie ou de sous-bois touffu. La strate arbustive est en effet généralement absente, alors que l'on trouve des exemplaires de fêrulle (*Ferula communis*) et d'ampelodesma (*Ampelodesmos mauritanicus*) qui constituent la strate herbacée. Le repeuplement naturel n'existe pas. Le peuplement se présente structurellement pauvre et homogène, il s'agit de futaies à un étage à couvrant régulier à plein, à arbres frêles et incréments ligneux très modestes, dont la litière ne s'accumule pas au sol mais est entraînée par les pluies, uniquement aux couches superficielles du terrain qui sont érodées malgré le couvert arboré (Fig. 6.9 et 6.10).



Fig. 6.9 - Agencement structural et conditions stationnelles d'une plantation d'*Eucalyptus camaldulensis*.





Fig. 6.10 - Agencement structural et conditions stationnelles des forêts d'eucalyptus

L'usage d'*Eucalyptus camaldulensis* a toutefois permis l'installation d'une surface boisée sur des sols très dégradés et de couvert arboré difficile, à forte salinité

par effet de la série sulfo-gypseuse, sur lesquels la colonisation par des espèces arbustives buissonnantes pose aussi de multiples problèmes techniques lors de la plantation. Ces reboisements, par rapport à d'éventuelles pinèdes de pin d'Alep, qui donneraient sûrement de meilleurs résultats en matière de sylviculture, présentent le seul avantage de possibilité de repartir en cas d'incendies, par ailleurs fréquents. À titre d'exemple, la Figure 6.11 illustre une plantation d'eucalyptus qui montre de façon évidente le passage du feu. ).



Fig. 6.11 - Plantation artificielle d'eucalyptus marquée par le passage d'un incendie.

Les bois d'eucalyptus d'Enna et de Piazza Armerina présentent par contre de meilleures caractéristiques structurelles et productives. Il s'agit de systèmes mixtes d'*Eucalyptus globulus* et *E. camaldulensis* sur des régosols et des sols bruns lixiviés, souvent sur zones sableuses, à moyenne et grande profondeur, sujets à l'érosion et dont les résultats productifs ont été bons à médiocres, en fonction des caractéristiques stationnelles. Dans les forêts d'eucalyptus à composition mixte, la principale espèce

est en revanche l'*Eucalyptus camaldulensis*, généralement associée à des conifères méditerranéens comme les *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Cupressus sempervirens* ou exotiques comme les *Cupressus arizonica* et *Cupressus macrocarpa*.

#### 6.3.2.2 Pinèdes

Les pinèdes pures sont des formations particulières disséminées en zones limitées du bassin. L'espèce la plus répandue dans ces systèmes est le pin d'Alep car il est le plus utilisé des conifères pour les opérations de reboisement et de boisement en Sicile en raison de sa capacité de s'enraciner et de pousser sur des substrats de fond fortement dégradés et de résister à de hautes températures et à une sécheresse prolongée. En effet, l'utilisation maximale et la diffusion de cette espèce sur l'île vient de l'activité intense de plantation forestière commencée après la deuxième guerre, dans le but de reboiser de vastes zones nues ou dégradées ou d'anciennes cultures avec des espèces à enracinement facile et à croissance rapide.

Le choix du pin d'Alep répondait donc à l'engagement de plantation et de production du forestier sicilien car, souvent contraint à consacrer à la forêt des sols plus pauvres et marginaux et à employer une main d'œuvre occasionnelle et non qualifiée, il parvenait à court terme à réaliser un couvert d'arbres homogène. Il ne faut en effet pas oublier que ces interventions de reboisement ont été réalisées essentiellement sur des sols argileux de colline ou de montagne, souvent à important affleurement rocheux et avec d'énormes difficultés techniques liées à la plantation (Fig. 6.12 et 6.13).





Fig. 6.12 - Vue d'une pinède de *Pinus halepensis*.



Fig. 6.13 - Pinèdes artificielles de *Pinus halepensis*.

Les pinèdes de *Pinus halepensis* s'étendent sur une superficie d'un peu plus de 700 hectares, soit 0.3% de la surface totale du bassin. La modeste entité des surfaces réservées à cette espèce en pureté témoigne que celle-ci a été utilisée, de façon générale, en tant qu'espèce plus que pour former des forêts de production. Parallèlement, le pin d'Alep se retrouve dans de nombreuses formations mixtes avec d'autres conifères méditerranéens sur près de 650 hectares et avec des eucalyptus sur près de 2000 hectares.

Ces plantations ont été réalisées sur des sols assez dégradés et concernent toujours des sols anciennement agricoles : le paysage pédologique varie des régosols de nature argileuse aux formations sulfo-gypseuses des provinces de Caltanissetta, Enna et Agrigente. Le pin d'Alep constitue des peuplements structurellement pauvres et homogènes, le degré élevé de couverture (>80%) dû à au manque de soins cultureux ne permet pas à des espèces secondaires de se développer, à l'exception de très petits exemplaires de *Cupressus sempervirens*. La strate arbustive est absente alors que le manteau herbacé est exclusivement composé d'*ampelodesma* (*Ampelodesmos mauritanicus*), la régénération naturelle n'existe pas (Fig. 6.14).

Sous l'aspect cultural, le module de culture demandait, au-delà d'éliminer la végétation parasite et d'assurer la protection des plants et des semis des agressions et des dommages provoqués par le gibier, d'effectuer aussi tous les soins dits d'exploitation qui comprenaient le nettoyage, l'éclaircissage et la taille basse pour conserver la couverture du sol dans le temps. Dans les faits, une bonne partie des pinèdes de pin d'Alep n'a pas fait l'objet de soins cultureux à la suite de leur plantation (nettoyages, éclaircissages, élagages) si ce n'est de façon sporadique et non en temps voulu.



Fig. 6.14 - Agencement structural et conditions stationnelles des pinèdes de pin d'Alep.

Enfin, aux effets de l'absence d'entretien adapté, tels que l'existence de troncs irréguliers, tordus et blessés et à faible stabilité dimensionnelle, s'ajoutent les effets du passage fréquent du feu, avec des dommages parfois irréversibles sur les peuplements (Fig.6.15).





Fig. 6.15 - Pinèdes de pin d'Alep traversées respectivement par un feu de surface (A) et par un feu de cimes (B).

Inversement, dans certains peuplements, d'opportunes interventions de sylviculture comme la pratique d'éclaircissages dans la juste proportion et aux

moments requis a réduit le risque de feux de forêts et a permis un meilleur développement des arbres qui, par une action de « nurserie » pour la régénération naturelle et/ou artificielle, en a assuré l'enracinement et la croissance en favorisant l'instauration de processus de renaturation. La fonction protectrice de la forêt a ainsi été préservée en dirigeant, parallèlement, les divers peuplements vers une phase d'équilibre plus stable avec l'environnement.

### 6.3.2.3 Forêts mixtes

Cette catégorie comprend toutes les formations ligneuses qui identifient des systèmes forestiers caractérisés par deux ou plusieurs espèces à différent degré de mélange. Il s'agit des peuplements classés comme forêts mixtes de conifères et de feuillus à prédominance de feuillus exotiques (eucalyptus), à prédominance de conifères méditerranéens comme les pins et les cyprès (Fig. 6.16), à prédominance de pins de montagne ou de conifères exotiques.



Fig. 6.16 - Plantation mixte de conifères et de feuillus à prédominance de pin d'Alep.

L'importance de l'effectif à l'intérieur du bassin examiné a orienté sur un approfondissement au niveau des formations mixtes de conifères et de feuillus à prédominance d'eucalyptus. Ces plantations s'étendent sur une superficie de près de 2000 hectares, soit 0.9% de la surface totale du bassin. Le foyer le plus étendu se trouve au centre du bassin, au niveau de la Réserve de Monte Capodarso, les autres étant disséminés sur toute la superficie du bassin. Ces reboisements, principalement constitués d'*Eucalyptus camaldulensis* (à 60% minimum) généralement associés au *Pinus halepensis* (env. 40%), ont été réalisés entre 1950 et 1970 pour tenter de protéger des zones à fort risque d'érosion de catastrophes hydrogéologiques ; il s'agit dans certains cas de plantations d'eucalyptus en stations inadaptées à vocation productive pour lesquelles avait été prévue, dans les années 70, la reconversion en pinèdes de pin d'Alep, toutefois partiellement appliquée. L'agencement structural de ces peuplements est assez homogène, structure horizontale uniforme et répartition des espèces par groupes, le degré de recouvrement de la strate arborescente est inférieur à 60% en raison de la présence de lacunes. La strate arbustive est pratiquement absente à l'exception de très rares exemplaires d'olivier sauvage (*Olea europea* var. *sylvestris*), d'aubépine (*Crataegus monogyna*) et d'asperge (*Asparagus acutifolius*). La strate herbacée présente un degré de recouvrement inférieur à 60% et est formée de graminées, de fêrle (*Ferula communis*) et d'ampelodesma (*Ampelodesmos mauritanicus*). La régénération naturelle n'existe pas. Il s'agit de peuplements peu vigoureux en raison des feux fréquents et des limites stationnelles, on rencontre souvent des sujets morts ou cassés (Fig. 6.17 et 6.18).





Fig. 6.17 - Plantation touchée par une grave catastrophe hydrogéologique.



Fig 6.18 - Agencement structural dégradé et conditions stationnelles d'une plantation artificielle mixte de conifères et feuillus à prédominance d'eucalyptus dans la R.N.O Monte Capodarso et Vallée de l'Imera méridional.



#### 6.3.2.4 Fourrés thermophiles

La classe des fourrés thermophiles comprend une grande partie de la végétation préforestière existant dans le bassin et s'étend sur une superficie de près de 15700 hectares, soit 7.2% de la superficie totale du bassin du fleuve Imera méridional. Il s'agit de formations souvent stabilisées par l'action de facteurs limitatifs de nature pédoclimatique ou par perturbation anthropique directe (coupe, feu) ou indirecte (pâturage) exercée sur la végétation, qui ne peut donc évoluer vers des cénoses potentielles (Fig. 6.19).



Fig. 6.19 - Détail d'un fourré développé sur des versants et escarpements rocheux assez abrupts.

Ces formations apportent des éléments de diversification du paysage et résultent des processus de destruction de la végétation arborescente et arbustive originelle ou de l'abandon de cultures et jouent encore un rôle important soit dans les processus dynamiques de la végétation soit parce qu'elles comptent des espèces rares voire endémiques. Elles dérivent des ensembles de type forestier et les dépassent

quand les interventions parasitent cessent. Les fourrés jouent aussi un rôle fondamental dans la conservation de la faune et de la flore : de nombreuses espèces animales et végétales (herbacées et arbustives) s'y sont effectivement adaptées. Ces formations, se développant dans la zone climatique potentielle des communautés associables au *Quercetalia ilicis*, sont dynamiquement liées aux forêts de chênes à feuillage persistant et mixtes, avec des chênes à feuillage caduque. Sans les facteurs parasites, elles permettraient la formation de forêts persistantes de *Quercus ilex* et *Quercus suber*. De plus, d'un point de vue purement dynamique, en s'interposant entre les forêts et les zones découvertes ou cultivées, elles représentent de structures qui, en favorisant la subsistance et l'introduction des essences en zones découvertes, peuvent évoluer en formations forestières stables (Fig. 6.20). Les communautés de couverture comprenant certaines espèces d'aubépine (*Crataegus monogyna*, *C. laciniata*, *C. oxyacantha*), et de rose (*Rosa canina*, *R. pouzini*, etc.), la ronce (*Rubus ulmifolius*), le genêt d'Espagne (*Spartium junceum*), le genêt épineux (*Calicotome infesta*), les poiriers (*Pyrus amygdaliformis* et *P. pyraster*), l'olivier sauvage (*Olea europea* var. *sylvestris*), etc. sont des exemples typiques. .



Fig. 6.20 - Aspects de formations arbustives caractérisant le territoire du bassin.

Cette catégorie recueille enfin toutes les espèces de végétation riveraine thermoxérophile de tamaris (*Tamarix gallica* et *T. africana*) et de laurier-rose, et hygrophile de *Salix* et *Populus* sp. pl., qui se situent respectivement sur les segments de moyenne vallée et de vallée, sur des sols limo-argileux subsalins et montagneux, sur des sols plus frais et profonds du fleuve Imera méridional et des autres cours d'eau qui lui sont affluents. Du point de vue structural, ce type de végétation constitue

rarement de véritables galeries impénétrables sur les cours d'eau permanents, alors que l'on observe des fourrés plus ou moins ras sur les torrents affluents de l'Imera méridional ou des vallons asséchés lors de la saison estivale.

#### 6.4 Degré de désertification du bassin

La stratification de la Carte des zones vulnérables à la désertification de la Sicile à l'échelle 1:250.000 avec périmètre du bassin (Annexe 6.5), la Carte d'utilisation du sol et la mosaïque des zones naturelles protégées s'inscrivant dans le bassin (Parc Régional, Réserves, SIC et ZPS) a permis de définir une classification du territoire du bassin et notamment des principales surfaces forestières et préforestières en fonction des différents degrés de susceptibilité aux processus de désertification. La carte du risque de désertification du bassin de l'Imera méridional (Annexe 6.6) montre qu'une bonne partie de la superficie du bassin est fortement vulnérable aux processus de désertification, en particulier les portions centrale et centro-méridionale du bassin, caractérisées par les substrats typiques de la série sulfo-gypseuse s'avèrent les plus exposées.

Ci-après figure un tableau synthétique (Tab. 6.3) des classes de risque de désertification et leur répartition surfacique dans la zone d'examen, notamment dans les principaux systèmes forestiers et préforestiers du bassin : bois d'eucalyptus, pinèdes de pin d'Alep, forêts mixtes de conifères et de feuillus à prédominance d'eucalyptus, fourrés thermophiles.

	Bacino Imera		Eucalipteti		Pinete		Boschi misti a prev. di eucalipto		Arbusteti	
Classe di rischio	sup. (ha)	%	sup. (ha)	%	sup. (ha)	%	sup. (ha)	%	sup. (ha)	%
<b>1 - Basso</b>	171.5	0.1								
<b>2 - Medio basso</b>	37441.2	18.4	934.6	17.4	176.2	24.2	1.3	0.1	3156.4	20.1
<b>3 - Medio alto</b>	103645.5	51.1	3133.4	58.4	328.4	45.1	807.3	41.6	9483.0	60.4

<b>4 - Elevato</b>	61776.2	30.4	1296.8	24.2	224.3	30.8	1132.1	58.3	3071.4	19.5
Totale	203034.4	100.0	5364.8	100.0	728.9	100.0	1940.7	100.0	15710.8	100.0

Tab. 6.3 - Classes de risque de désertification et répartition surfacique pour le bassin de l'Imera et pour les principaux systèmes forestiers et préforestiers.

L'analyse des données met en évidence que 81% de la superficie totale du bassin est sujet à un risque élevé de désertification : 51% de la superficie entre dans la troisième classe (risque moyen élevé), 30% entre par contre dans la quatrième classe (risque élevé). 18% de la superficie du bassin entre en deuxième classe (risque moyen bas), tandis que seulement 171.5 hectares, soit 0.1% de la superficie entre en première classe (risque bas).

Ce scénario se répète en analysant les données de répartition spatiale et en pourcentage des peuplements cités plus haut, comme le signale l'Annexe 6.7. Près de 80% des surfaces plantées d'eucalyptus, pinèdes et fourrés sont classées à risque de désertification élevé (troisième et quatrième classe), les autres surfaces entrent en revanche dans la classe de risque moyen bas. La situation s'aggrave ensuite pour les plantations mixtes à prédominance d'eucalyptus car elles sont toutes (99.9%) sur des sols classés à risque élevé de désertification : 58.3% de la superficie totale entre dans la quatrième classe (risque élevé), alors que 41.6% entre dans la troisième classe (risque moyen élevé).

### **6.5 Lignes directrices de gestion forestière pour la mitigation des processus de désertification**

Ce dernier paragraphe fournit un tableau d'hypothèses de gestion pour la rédaction des lignes de conduites en matière de gestion des peuplements forestiers et préforestiers du bassin de l'Imera méridional, fonctionnelles pour la mitigation des processus de désertification.

La gestion d'un système naturel et semi-naturel est une mission difficile en vertu de la grande variabilité des composantes abiotiques et biotiques, tant naturelles qu'artificielles, qui entrent en jeu. Une approche multicritère et multifactorielle de l'ensemble du système, étudiée en tant que superorganisme susceptible de réagir et de répondre diversement à différentes *entrées* externes, est nécessaire. Ici, dans les phytocénoses forestières, l'étude porte non seulement sur les structures et la composition spécifique, mais surtout sur le fonctionnement des dynamiques évolutives en réponse aux interventions effectuées, pour mieux prédéterminer les réponses pouvant être obtenues (Ciancio, 1998). Les objectifs fixés et à atteindre avec les lignes d'intervention et de gestion sont fondamentalement : la préservation et la conservation.

On entend par préservation la protection des peuplements forestiers et préforestiers du bassin qui peut s'obtenir par le biais de lignes d'intervention ou de non intervention qui se définissent dans la libre évolution et dans le monitoring. La conservation consiste à appliquer des méthodes de gestion qui aboutissent à une augmentation de la biodiversité, des complexités d'organisation et à la gestion durable des ressources existantes. La principale ligne d'intervention prévue pour atteindre cet objectif est la renaturation, c'est-à-dire l'ensemble de techniques qui favorisent l'instauration de mécanismes d'autorégulation et d'autoperpétuation en augmentant de fait la résistance et la résilience des écosystèmes (Nocentini, 2000). Une fois les objectifs généraux définis, il a été possible d'identifier des lignes directrices de gestion pour ces peuplements (Tab. 6.4).

<b>Linea gestionale</b>	<b>Descrizione degli interventi</b>	<b>Strumenti tecnici</b>
Non intervento	Osservazione scientifica	Monitoraggio, inventario
Ricostituzione naturalistica	Rinnovazione naturale	Selvicoltura sistemica
Mantenimento del paesaggio	Proseguimento delle attività svolte fino ad oggi	Pascolo, agricoltura
Restauro ambientale	Restauro del paesaggio in aree degradate	Ingegneria naturalistica

Interventi specifici	Interventi applicati a casi tipici e peculiari	Strumenti vari
----------------------	--	----------------

Tab. 6.4. - Lignes de gestion adoptables pour les surfaces forestières et préforestières du bassin.

La “Non intervention” consiste à destiner les zones concernées à l’observation scientifique et à un monitoring continu, afin d’enregistrer l’évolution spontanée de l’écosystème. Ces zones sont identifiées par les prés, les pâturages, les fourrés et les forêts buissonnantes où l’étude des dynamiques naturelles exige une modélisation, surtout aux fins d’une gestion correcte des autres zones.

On entend par «Reconstitution naturelle » la création des conditions pour que soient accélérés tous les processus naturels représentant la réponse évolutive des cénozes à des phénomènes parasites divers, surtout anthropiques. L’intervention particulière de cette ligne de gestion consiste à favoriser la régénération naturelle ou la diffusion d’espèces autochtones dans des peuplements d’espèces exotiques. Il faut toutefois faire la différence entre des interventions sur des peuplements forestiers et celles sur des cénozes préforestières telles que les fourrés thermophiles. L’approche technique la plus appropriée aux interventions de renaturation est la sylviculture systémique. Plus précisément, une gestion orientée sur la renaturation doit prévoir l’identification de trois phases : Le moment structural, le moment cultural et le moment gestionnel (*Nocentini*, 2002). Le moment structural est un inventaire organique multicible et multiressources de la zone examinée. Le moment cultural représente le choix des modalités d’intervention en fonction du cadre structural. Le moment gestionnel se concrétise par contre dans le monitoring des réponses de l’écosystème pour l’évaluation de l’efficacité culturelle précédente (*Ciancio et al.*, 2002).

« L’Entretien du paysage » est une ligne de gestion qui prévoit la continuité des opérations faites jusqu’ici, à condition que leur impact sur l’environnement soit faible, pour diverses raisons. Pour des raisons de gestion et/ou économiques, le maintien du pâturage ou des activités agricoles peut par exemple être justifié.

Dans le territoire du bassin se présente souvent le problème de la « Restauration de l'environnement » au sens de rétablissement des conditions naturelles de sites dégradés ou dépourvus de cette valeur, se référant notamment aux nombreuses carrières, à des zones parcourues ou dévastées par des feux, à des décharges abusives, etc. Il est indispensable dans tous ces cas de prévoir un plan pour leur réhabilitation par le biais de techniques de génie de l'environnement, ou des interventions d'autre nature susceptibles d'en réduire, en tout cas, l'impact visuel, écologique et fonctionnel (*La Mantia et al.*, 2000).

Pour finir, des « Interventions spécifiques » peuvent être définies pour des motifs de gestion particuliers. Dans cette ligne de gestion s'inscrivent une série d'opérations hétérogènes entre elles et d'intérêt particulier, dont il est difficile de prévoir les différents cas : création de zones et de parcours didactiques naturels, zones équipées, zones d'intérêt archéologiques, zones d'élevage d'animaux pour réintroductions ou repeuplements de faune, zones de prélèvement génétiques, centres de diffusion de semence, etc.

En somme, dans la formulation des lignes directrices de gestion, on a cherché à proposer des interventions, voire des pratiques de sylviculture axées sur l'augmentation de la biodiversité, sur la renaturation, sur l'augmentation de la complexité des peuplements et des communautés, sur l'aide aux fonctions de la forêt, sur la garantie dans le temps d'une certaine stabilité des formations naturelles, qui puissent fonctionner suite à la mitigation des processus de désertification.

Ci-après figure un tableau synthétique des lignes d'intervention proposées pour les différentes unités de gestion concernant les principaux systèmes forestiers et préforestiers du bassin de l'Imera méridional (Tab. 6.5).

Unità di gestione	Linee di intervento
Eucalipteti	Induzione alla rinaturalizzazione mediante l'introduzione di specie ecologicamente coerenti
Pinete a pino d'Aleppo	Rinaturalizzazione a gruppi con discreto grado di mescolanza specifica: modulazione graduale dei diradamenti



Boschi misti a prevalenza di eucalipto	Rinaturalizzazione a gruppi con discreto grado di mescolanza specifica: modulazione graduale dei diradamenti
Arbusteto termofilo	Interventi specifici Libera evoluzione Monitoraggio
Nuove aree da imboscire	Rimboschire utilizzando specie arboree autoctone

Tab. 6.5 - Synthèse des lignes d'intervention sur les principaux systèmes forestiers et préforestiers.

L'absence d'éléments résiduels de formations ligneuses, auxquelles peut être attribué le rôle potentiel de centres de diffusion de semence d'espèces forestières autochtones sur une grande partie du territoire de l'Imera méridional et en particulier dans les zones les plus vulnérables à la désertification, ne permet pas une reconstitution naturelle rapide des peuplements artificiels. L'induction à la renaturation aux fins de formation de centres stables de diffusion de semence forestière se configure donc comme une ligne d'intervention indispensable pour augmenter la biodiversité et la complexité structurale de ces peuplements à structure simplifiée et toujours très dégradés, ainsi que pour réduire progressivement le risque de désertification de ces surfaces. L'analyse des caractéristiques écologiques et stationnelles des peuplements existant dans la zone d'étude souligne en effet la forte dégradation et le faible degré de fertilité des substrats étudiés, qui se répercutent inévitablement sur les peuplements correspondants.

### 6.5.1 Types d'intervention

En fonction des lignes d'intervention à caractère général précédemment déterminées, les types d'intervention de sylviculture sur les principaux peuplements forestiers et préforestiers, distingués en fonction du risque de désertification (Annexe 6.6) et du degré de couvert arboré et/ou arbustif qui les caractérisent sont décrits ci-après.

Les types d'intervention proposés pour les eucalyptus, les pinèdes artificielles de pin d'Alep et les forêts mixtes de conifères et de feuillus à prédominance d'eucalyptus peuvent se résumer comme suit:

- Les eucalyptus constituent en général des peuplements structurellement peu évolués et homogènes à degré élevé de couvert arboré et sont répandus pour près de 80% de leur superficie totale dans des zones à risque élevé de désertification (troisième et quatrième classe de risque) sur des substrats principalement sableux subsalins. Pour ces peuplements, il est jugé opportun d'effectuer des éclaircissements progressifs du peuplement existant afin d'en réduire la densité totale, puis le remplacement progressif de l'eucalyptus par des essences autochtones écologiquement compatibles et la sous-plantation d'espèces autochtones (arbustives et herbacées) typiques de la série sulfo-gypseuse comme la salsola (*Salsola verticillata*), mais aussi le genêt d'Espagne (*Spartium junceum*), le genêt épineux (*Calicotome infesta*), l'olivier sauvage (*Olea europea* var. *sylvestris*), etc.
- Pour les pinèdes artificielles de pin d'Alep, il est indispensable de favoriser la renaturation par groupes de la futaie par interventions progressives d'éclaircissement et sous-plantation de feuillus autochtones comme le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), le frêne (*Fraxinus ornus*) et d'espèces arbustives comme l'olivier sauvage (*Olea europea* var. *Sylvestris*), les poiriers (*Pyrus amygdaliformis* et *P. pyraeaster*), certaines espèces d'aubépine (*Crataegus monogyna*, *C. laciniata*, *C. oxyacantha*).
- Des interventions axées sur la renaturation seront effectuées aussi sur les forêts mixtes à prédominance d'eucalyptus. Pour ces plantations, plus développées sur des sols principalement sableux et qui forment des peuplements dégradés en raison de l'activité de pâturage excessive ou de fréquents incendies, il n'est pas prévu d'éclaircissements car leur faible degré de couvert arboré conduit à la prudence pour éviter d'ultérieures érosions du sol. Toutefois, la perspective est le remplacement progressif des eucalyptus et le remplissage par groupes,

surtout dans les zones lacunaires, de pin pignon (*Pinus pinea*) qui grâce à ses fortes propriétés héliophiles, sa résistance à la sécheresse et sa rusticité, associées aux bonnes croissances initiales et la capacité de recouvrement à relativement court terme, garantit une bonne diversification structurale et une augmentation de la biodiversité. Il s'avère toutefois indispensable de constituer un tapis arbustif par sous-plantation d'espèces arbustives autochtones telles que l'olivier sauvage (*Olea europea* var. *sylvestris*), certaines espèces d'aubépine (*Crataegus monogyna*, *C. laciniata*, *C. oxyacantha*), la filaria (*Phillyrea latifolia*), le lentisque (*Pistacia lentiscus*), etc.

- Les zones à préserver et à laisser évoluer librement, sous l'observation scientifique, ou à destiner à des interventions spécifiques concernant les surfaces de fourrés, ces systèmes présentant des espèces écologiquement cohérentes et de grand intérêt botanique à préserver pour le maintien de la biodiversité et de la diversification du paysage. Les fourrés thermophiles sont les principales cénoses préforestières présentes dans le bassin étudié, ils comprennent des zones à fort caractère naturel et sont généralement constitués de formations plurispécifiques. On trouve toutefois quelques zones pauvres sur le plan de la flore en raison de l'excessive pression de pâturage ou d'incendies fréquents, qui exigent donc des interventions spécifiques afin d'augmenter la complexité écologique et structurale de ces systèmes. En ce sens, l'introduction d'essences et d'arbustes autochtones comme l'olivier sauvage (*Olea europea* var. *sylvestris*), l'amandier (*Prunus communis*), le caroubier (*Ceratonia siliqua*), le micocoulier (*Celtis australis*), le lentisque (*Pistacia lentiscus*), le poirier (*Pirus pyraster*), le frêne oxyphylle (*Fraxinus oxyphylla*), etc. est jugée extrêmement efficace.
- Il est prévu, enfin, de reboiser des zones non boisées (terres à végétation rase ou anciennement cultivées) avec des essences et des arbustes écologiquement cohérents aux caractéristiques pédoclimatiques du territoire étudié.

### 6.5.2 Lignes directrices pour les opérations de reboisement

Dans l'objectif d'une soigneuse planification forestière qui associe, autrement que par le récent passé, l'extension de la superficie sylvicole à la préservation du sol, à l'augmentation de la production de biomasse et au choix d'essences adaptées aux caractéristiques pédoclimatiques du territoire, il est souhaitable de caractériser et de trouver dans le secteur du bassin des zones écologiquement homogènes auxquelles indiquer les essences utilisables pour des opérations de reboisement. Par zone écologiquement homogène a été notamment entendu une portion de territoire cartographiable caractérisée par une forte homogénéité pédoclimatique à laquelle associer les différentes essences, en considérant le plus grand ou le plus faible potentiel des sols qui les recevront, utilisables justement pour des plantations de reboisement, de boisement et/ou pour l'arboriculture pour le bois. Pour réduire la fragmentation des centres boisés et développer parallèlement la superficie sylvicole, les zones contiguës aux forêts existantes et/ou comprises entre elles ont été définies comme zones pouvant faire l'objet d'interventions de reboisement.

L'association des caractéristiques de type pédo-géologique et bioclimatique du territoire du bassin de l'Imera méridional a permis de trouver un total de 18 zones écologiquement homogènes (*Maetzke et al.*, en cours d'impression). Toutefois, parmi les plus représentées en allant du Nord au Sud, il faut citer les formations carbonatées de la bande supra méditerranéenne qui constituent les Madonie, les formations principalement argileuses et sulfo-gypseuses de la bande thermo méditerranéenne et méso méditerranéenne qui concernent la partie centrale et centro-méridionale du bassin, les dépôts alluviaux de la bande thermo méditerranéenne répandus le long des cours d'eau et constituant la plaine de Licata.

Les espèces dont l'utilisation est proposée à l'intérieur des zones écologiquement homogènes sont généralement plastiques et de meilleure adaptabilité aux différents contextes environnementaux. Sur les formations carbonatées de la bande supra méditerranéenne, il est proposé la plantation de *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus arizonica*, *Acer*

*campestre*, *Castanea sativa*, *Fraxinus ornus*, *Fraxinus oxycarpa*, *Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Celtis australis* pour la strate arborescente, de *Crataegus* sp. pl., *Olea europea* var. *sylvestris*, *Pyrus amygdaliformis*, *Prunus spinosa*, *Sorbus*, *Rosa* e *Morus* sp.pl. pour la strate arbustive. Sur les substrats argileux de la bande thermo- et mésoméditerranéenne, il est proposé d'utiliser les *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus arizonica*, *Fraxinus ornus*, *Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Celtis australis* pour la strate arborescente, les *Crataegus* sp. pl., *Olea europea* var. *sylvestris*, *Pyrus amygdaliformis*, *Prunus spinosa*, *Sorbus* e *Rosa* sp.pl. pour la strate arbustive. Sur les formations sulfo-gypseuses, il est proposé d'utiliser les *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressus macrocarpa*, *Cupressus arizonica*, *Quercus ilex*, *Ceratonia siliqua* pour la strate arborescente, *Crataegus monogyna*, *Olea europea* var. *sylvestris*, *Pyrus amygdaliformis*, *Spartium junceum* pour la strate arbustive. Sur les dépôts alluviaux à matrice sableuse, il est souhaitable, enfin, d'utiliser les *Pinus pinea*, *Celtis australis*, *Ceratonia siliqua* pour la strate arborescente, les *Olea europea* var. *sylvestris*, *Morus* sp.pl. et, dans les contextes plus chauds, *Pistacia lentiscus*, *Spartium junceum* et *Tamarix* sp.pl. pour la strate arbustive.

Les interventions proposées permettent de comprendre à quel point le dernier objectif à poursuivre soit d'augmenter la biodiversité des systèmes et la diversification structurale afin d'accroître la stabilité et la capacité d'auto-organisation des cénoses forestières et préforestières du bassin. Ces interventions contribueront à long terme à une augmentation de la fertilité des sols, à la réduction des phénomènes érosifs et donc à une sensible diminution de la vulnérabilité à la désertification.

En conclusion, il sera nécessaire de tenir compte du rapport pâturage-interventions de sylviculture. La plupart des interventions de sylviculture nécessitent en fait, pour être réussies, l'arrêt temporaire de l'activité de pâturage afin d'éviter d'autres dommages aux espèces plantées lors des interventions, aux nouvelles plantations ou à une éventuelle régénération.

Ci-après figure un tableau synthétique mais précis des types d'intervention de sylviculture proposés pour les principaux systèmes forestiers et préforestiers du bassin

étudiés, différenciés selon le risque de désertification et du degré de recouvrement (Tab. 6.6).

Tipo forestale	Eucalipteto				Pineta a pino d'Aleppo				Bosco misto a prevalenza di eucalipto				Arbusteti termofili			
Caratteristiche ecologico-stazionali																
Struttura e composizione del soprassuolo	Fustaia artificiale di <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (100%)				Pineta artificiale di <i>Pinus halepensis</i> (>90%) con <i>Cupressus sempervirens</i> (<10%)				Fustaia artificiale mista a prevalenza di <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (60%) con <i>Pinus halepensis</i> (40%)				Formazioni arbustive plurispecifiche			
													arbustive ed erbacee			
													colma		lacunosa	
Intensità della copertura	protezione idrogeologica				protezione idrogeologica				protezione idrogeologica				colma		lacunosa	
Funzione													protezione idrogeologica			
Rischio di desertificazione																
Classi di rischio	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°
	basso	medio basso	medio alto	elevato	basso	basso	medio alto	elevato	basso	basso	medio alto	elevato	basso	basso	medio alto	elevato
Superficie interessata (ha)	934.6				176.2				1.3				3156.4			
Superficie interessata (%)	17.4				24.2				0.1				20.1			
Tipo di intervento selvicolturale																
Diradamenti graduali e induzione alla rinaturalizzazione				Rinaturalizzazione discreta a gruppi: diradamenti graduali e sottopiantagione di latifoglie autoctone (roverella, orniello) Inserimento di specie arbustive autoctone				Nessun intervento di diradamento Rinfoltimento a gruppi con pino domestico Sottopiantagione di specie arbustive autoctone				Nessun intervento: libera evoluzione e monitoraggio		Rinfoltimento con specie arbustive ed erbacee autoctone		
mediante graduale sostituzione dell'eucalipto																
con specie ecologicamente coerenti																
Inserimento di specie arbustive autoctone																

Tab. 6.6 - Tableau synthétique des types d'interventions de sylviculture pour les principaux types forestiers et préforestiers du bassin de l'Imera méridional.

## ANNEXES

### ANNEXE 6.1 - ORGANISATION HIÉRARCHIQUE DES TYPES D'UTILISATION DU SOL SELON LE SYSTÈME CLC

#### 1. SUPERFICI ARTIFICIALI

- 1.1. Zone urbanizzate di tipo residenziale
  - 1.1.1. Zone residenziali a tessuto continuo
  - 1.1.2. Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado
- 1.2. Zone industriali, commerciali ed infrastrutturali
  - 1.2.1. Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati
  - 1.2.2. Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche
  - 1.2.3. Aree portuali
  - 1.2.4. Aeroporti
- 1.3. Zone estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati
  - 1.3.1. Aree estrattive
  - 1.3.2. Discariche
  - 1.3.3. Cantieri
- 1.4. Zone verdi artificiali non agricole
  - 1.4.1. Aree verdi urbane
  - 1.4.2. Aree ricreative e sportive

#### 2. SUPERFICI AGRICOLE UTILIZZATE

- 2.1. Seminativi
  - 2.1.1. Seminativi in aree non irrigue
    - 2.1.1.1. Colture intensive
    - 2.1.1.2. Colture estensive
  - 2.1.2. Seminativi in aree irrigue
  - 2.1.3. Risaie
- 2.2. Colture permanenti
  - 2.2.1. Vigneti
  - 2.2.2. Frutteti e frutti minori
  - 2.2.3. Oliveti
  - 2.2.4. Arboricoltura da legno
    - 2.2.4.1. Pioppicoltura
    - 2.2.4.2. Latifoglie pregiate (quali ciliegio e noce)
    - 2.2.4.3. Eucalitteti
    - 2.2.4.4. Conifere (quali pino insigne)
    - 2.2.4.5. Impianti misti di latifoglie e conifere
- 2.3. Prati stabili (foraggiere permanenti)
  - 2.3.1. Prati stabili (foraggiere permanenti)
- 2.4. Zone agricole eterogenee
  - 2.4.1. Colture temporanee associate a colture permanenti
  - 2.4.2. Sistemi colturali e particellari complessi
  - 2.4.3. Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
  - 2.4.4. Aree agroforestali

#### 3. TERRITORI BOSCATI E AMBIENTI SEMI-NATURALI

- 3.1. Zone boscate
  - 3.1.1. Boschi di latifoglie
    - 3.1.1.1 Boschi a prevalenza di querce e altre latifoglie sempreverdi (quali leccio e sughera)



- 3.1.1.2 Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (cerro e/o roverella e/o farnetto e/o rovere e/o farnia)
- 3.1.1.3. Boschi misti a prevalenza di altre latifoglie autoctone (latifoglie mesofile e mesotermofile quali acero-frassino, carpino nero-orniello)
- 3.1.1.4 Boschi a prevalenza di castagno
- 3.1.1.5 Boschi a prevalenza di faggio
- 3.1.1.6. Boschi a prevalenza di specie igrofite (quali salici e/o pioppi e/o ontani, ecc.)
- 3.1.1.7. Boschi ed *ex*-piantagioni a prevalenza di latifoglie esotiche (quali robinia e ailanto)
- 3.1.2. Boschi di conifere
  - 3.1.2.1. Boschi a prevalenza di pini mediterranei e cipressi (pino domestico, pino marittimo, pino d'aleppo)
  - 3.1.2.2 Boschi a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani (pino nero e laricio, pino silvestre, pino loricato)
  - 3.1.2.3 Boschi a prevalenza di abeti (quali bianco e/o rosso)
  - 3.1.2.4 Boschi a prevalenza di larice e/o pino cembro
  - 3.1.2.5 Boschi ed *ex*-piantagioni a prevalenza di conifere esotiche (quali douglasia, pino insigne, pino strobo)
- 3.1.3. Boschi misti di conifere e latifoglie
  - 3.1.3.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di latifoglie
    - 3.1.3.1.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce e altre latifoglie sempreverdi (quali leccio e sughera)
    - 3.1.3.1.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce caducifoglie (cerro e/o roverella e/o farnetto e/o rovere e/o farnia)
    - 3.1.3.1.3. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di altre latifoglie autoctone (latifoglie mesofile e mesotermofile quali acero-frassino, carpino nero-orniello)
    - 3.1.3.1.4. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di castagno
    - 3.1.3.1.5. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di faggio
    - 3.1.3.1.6. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di specie igrofite (quali salici e/o pioppi e/o ontani, ecc.)
    - 3.1.3.1.7. Boschi misti di conifere e latifoglie a prev. di specie esotiche
  - 3.1.3.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di conifere
    - 3.1.3.2.1. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini mediterranei e cipressi (pino domestico, pino marittimo, pino d'aleppo)
    - 3.1.3.2.2. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini oro-mediterranei e montani (pino nero e laricio, pino silvestre, pino loricato)
    - 3.1.3.2.3. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di abeti (quali bianco e/o rosso)
    - 3.1.3.2.4. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di larice e/o pino cembro
    - 3.1.3.2.5. Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di conifere esotiche (quali douglasia, pino insigne, pino strobo)

- 3.2. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
  - 3.2.1. Aree a pascolo naturale e praterie
    - 3.2.1.1 Praterie continue
    - 3.2.1.2 Praterie discontinue
  - 3.2.2. Brughiere e cespuglietti
    - 3.2.2.1 Arbusteti montani
    - 3.2.2.2 Arbusteti termofili
  - 3.2.3. Aree a vegetazione sclerofilla
    - 3.2.3.1 Macchia alta
    - 3.2.3.2 Macchia bassa e garighe
  - 3.2.4. Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione
- 3.3. Zone aperte con vegetazione rada o assente
  - 3.3.1. Spiagge, dune e sabbie
  - 3.3.2. Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti
  - 3.3.3. Aree con vegetazione rada
  - 3.3.4. Aree percorse da incendi (necessitano di qualificazione di quarto livello)
  - 3.3.5. Ghiacciai e nevi perenni

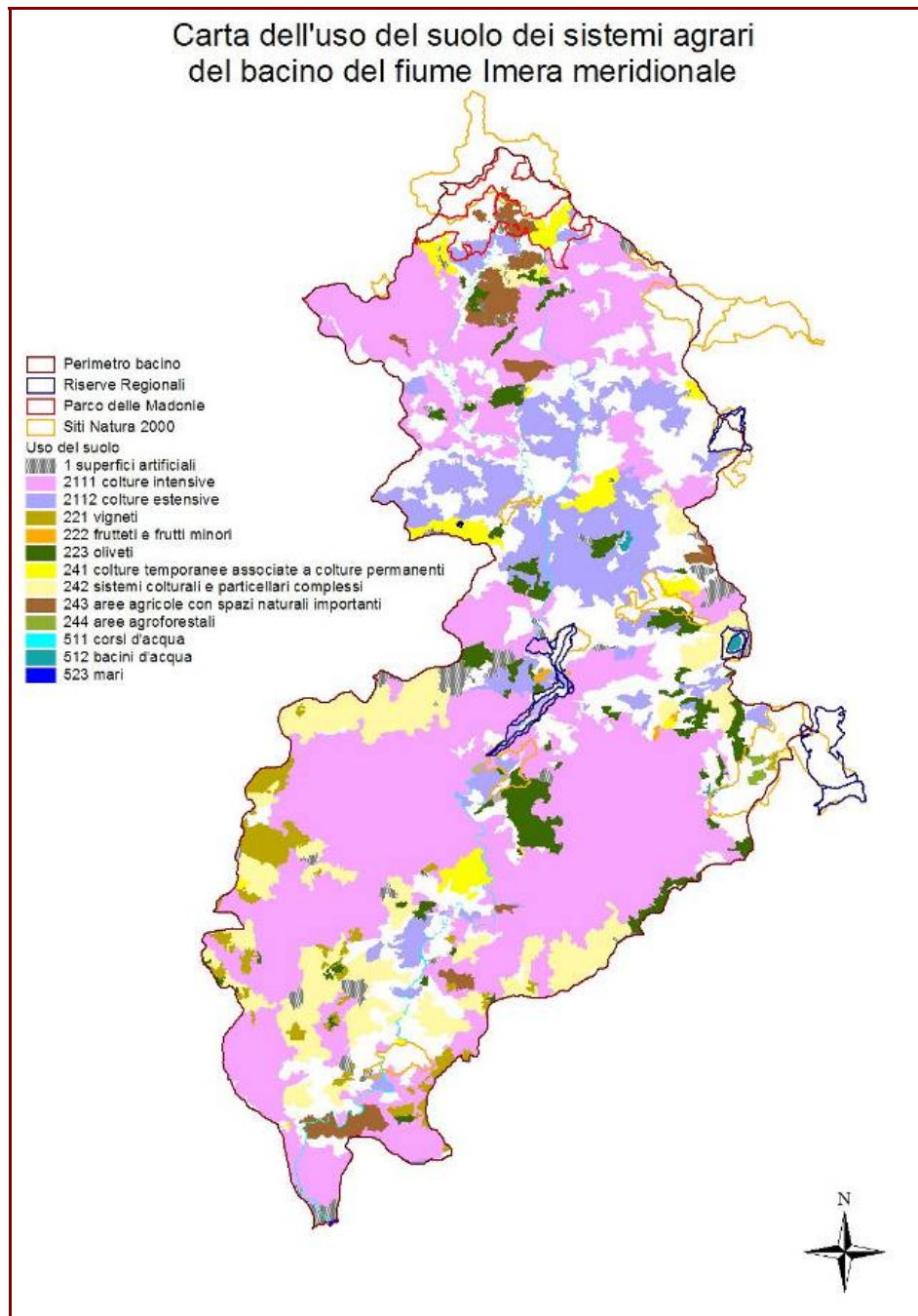
#### 4. ZONE UMIDE

- 4.1. Zone umide interne
  - 4.1.1. Paludi interne
  - 4.1.2. Torbiere
- 4.2. Zone umide marittime
  - 4.2.1. Paludi salmastre
  - 4.2.2. Saline
  - 4.2.3. Zone intertidali

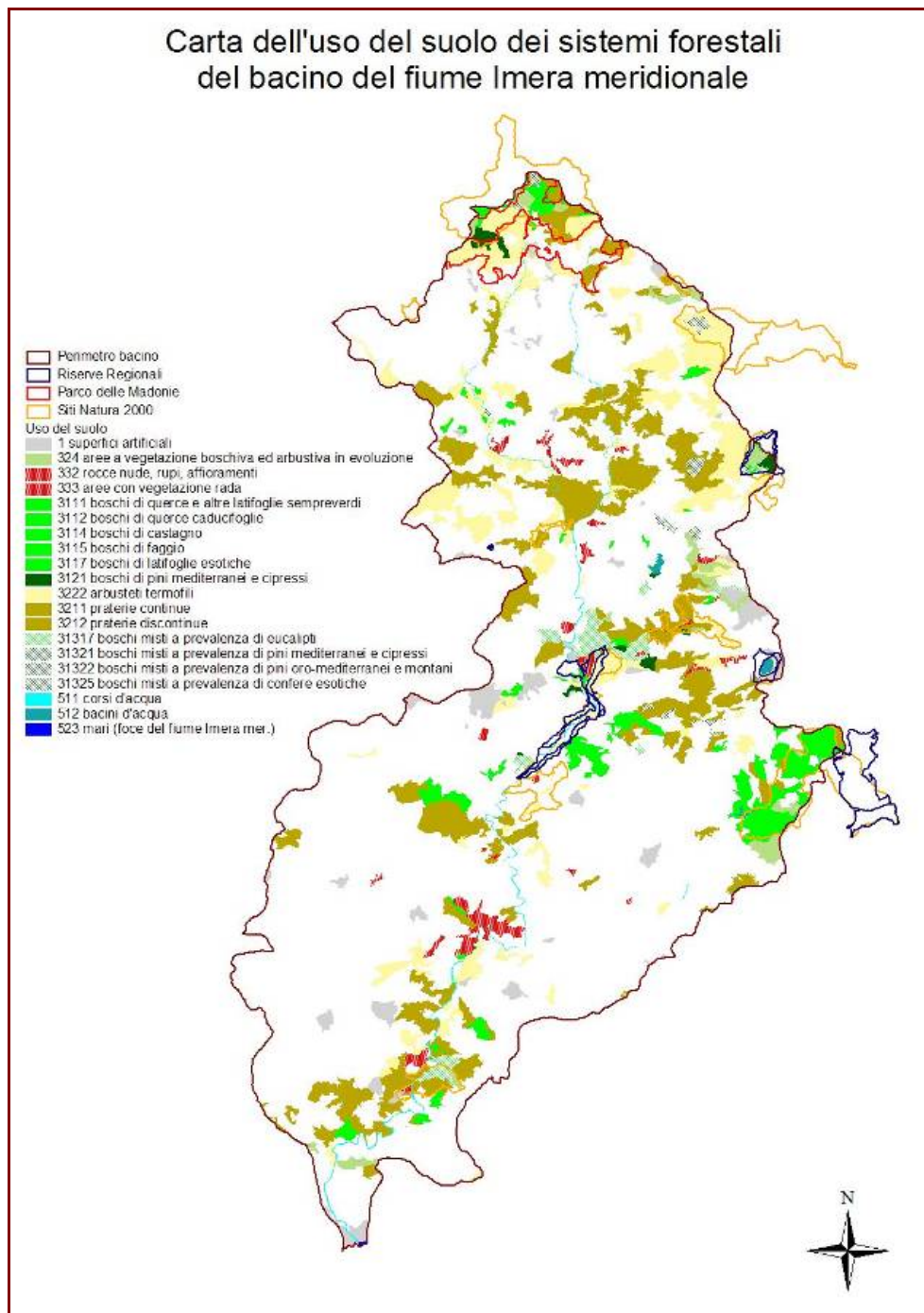
#### 5. CORPI IDRICI

- 5.1. Acque continentali
  - 5.1.1. Corsi d'acqua, canali e idrovie
  - 5.1.2. Bacini d'acqua
- 5.2. Acque marittime
  - 5.2.1. Lagune
  - 5.2.2. Estuari
  - 5.2.3. Mari

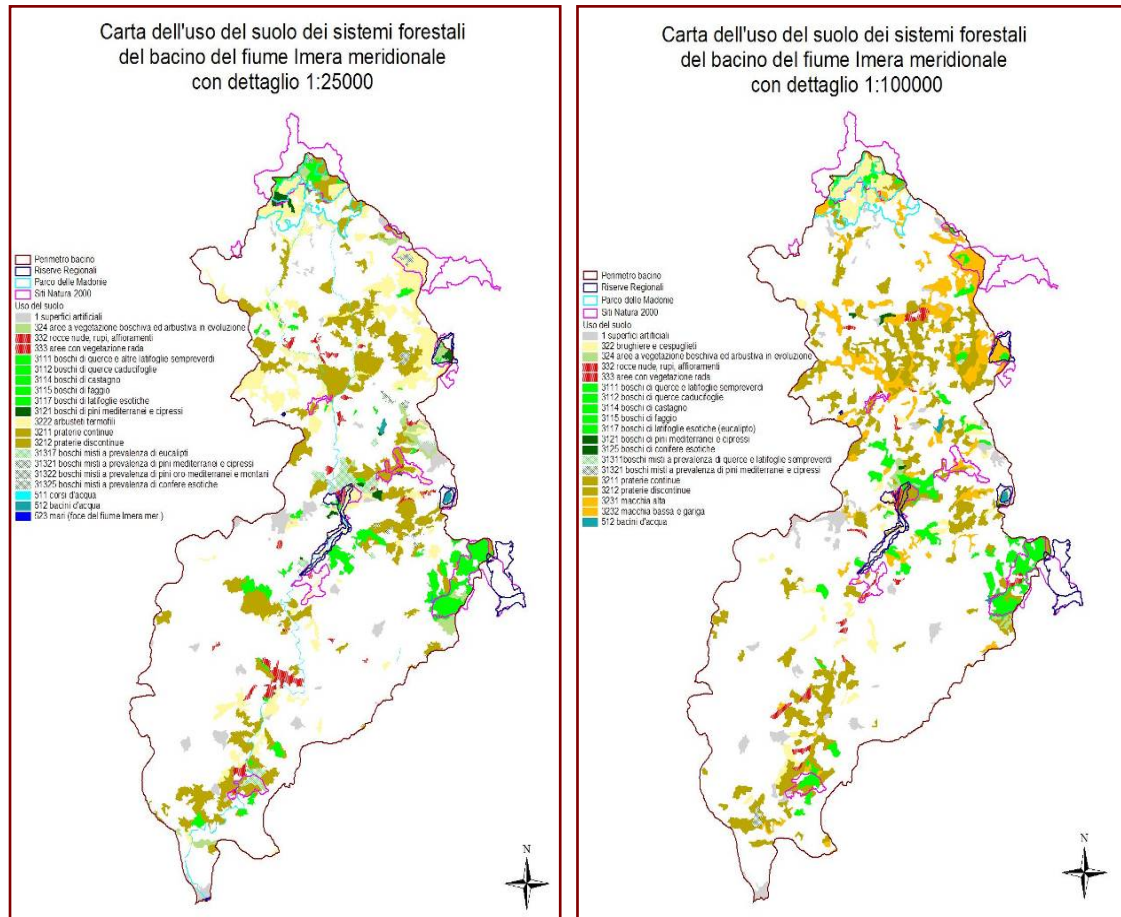
## ANNEXE 6.2 - CARTE DE L'UTILISATION DU SOL DES SYSTÈMES AGRICOLES



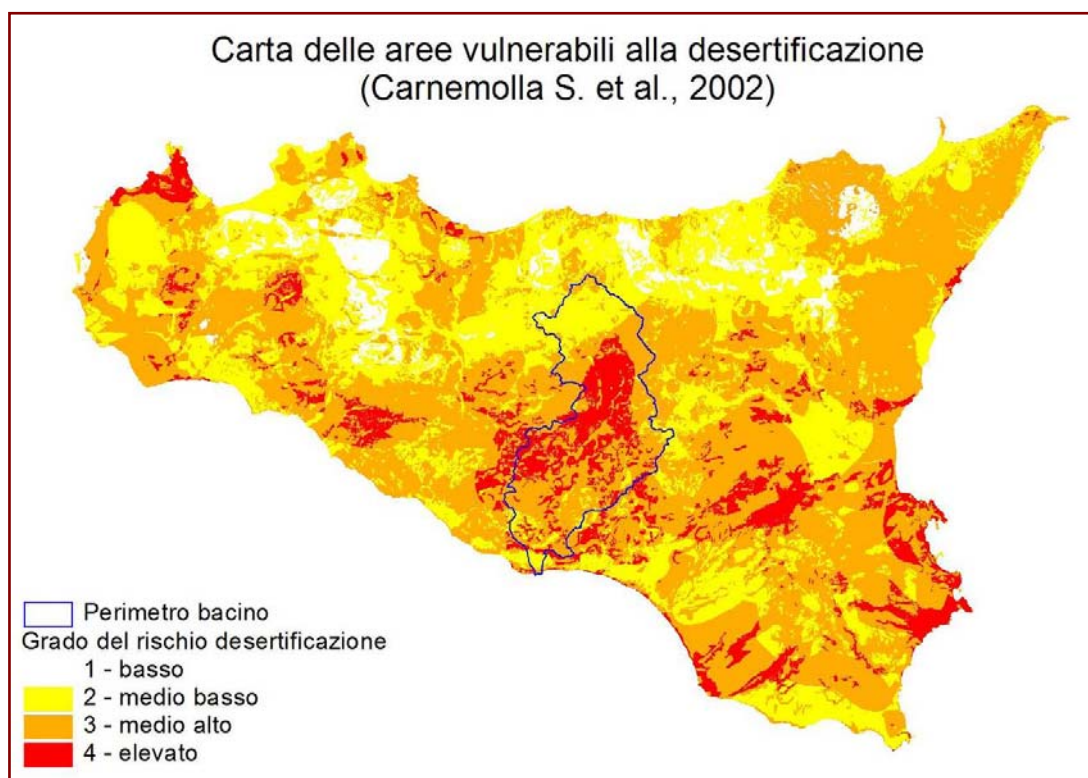
**ANNEXE 6.3 - CARTE DE L'UTILISATION DU SOL DES SYSTÈMES  
FORESTIERS  
(DÉTAIL ÉCHELLE 1:100000).**



## ANNEXE 6.4 - CARTE DE L'UTILISATION DU SOL DES SYSTÈMES FORESTIERS (DÉTAIL ÉCHELLE 1:250000.

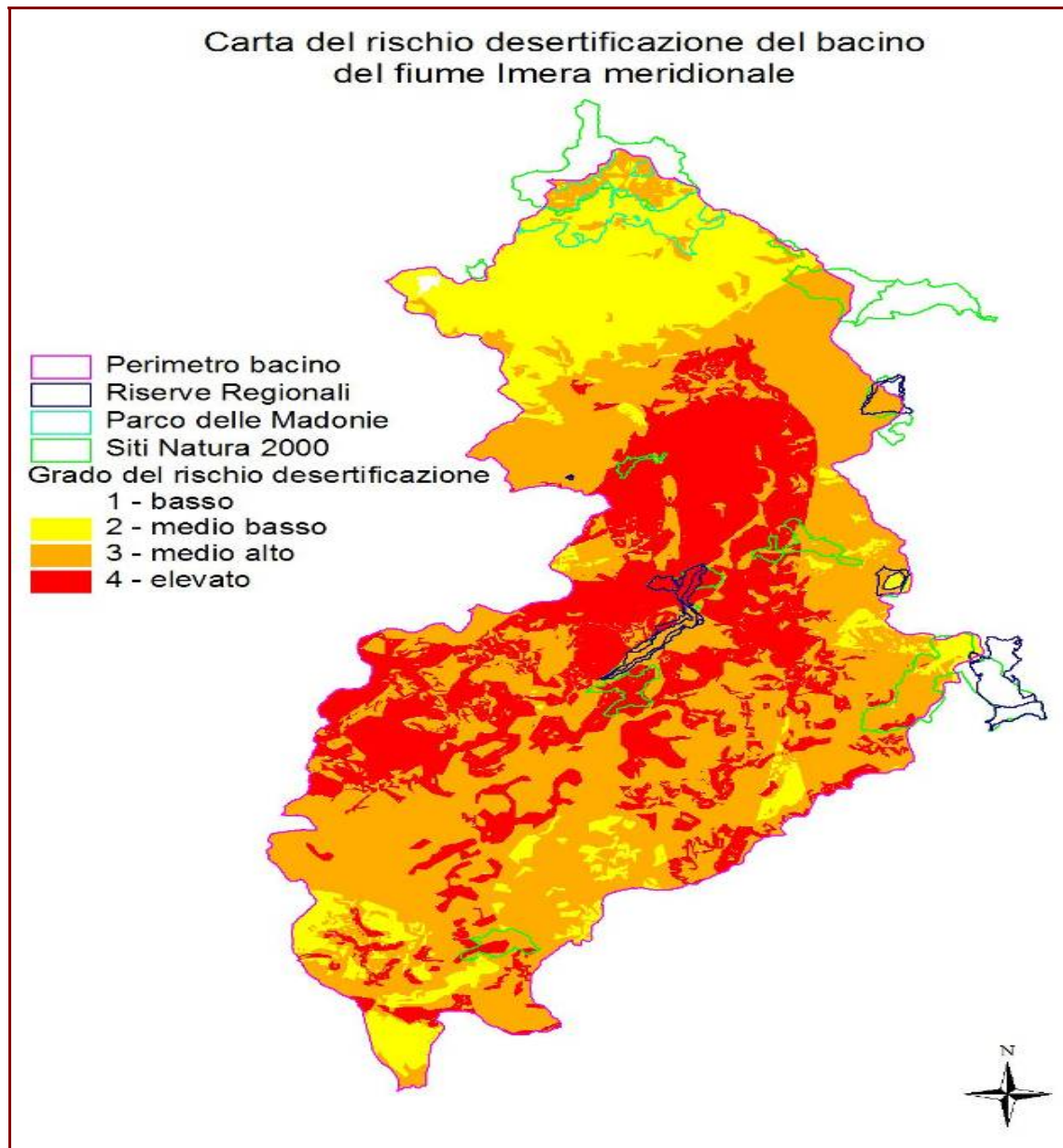


## Annexe 6.5 - Carte des zones vulnérables au risque de désertification en Sicile

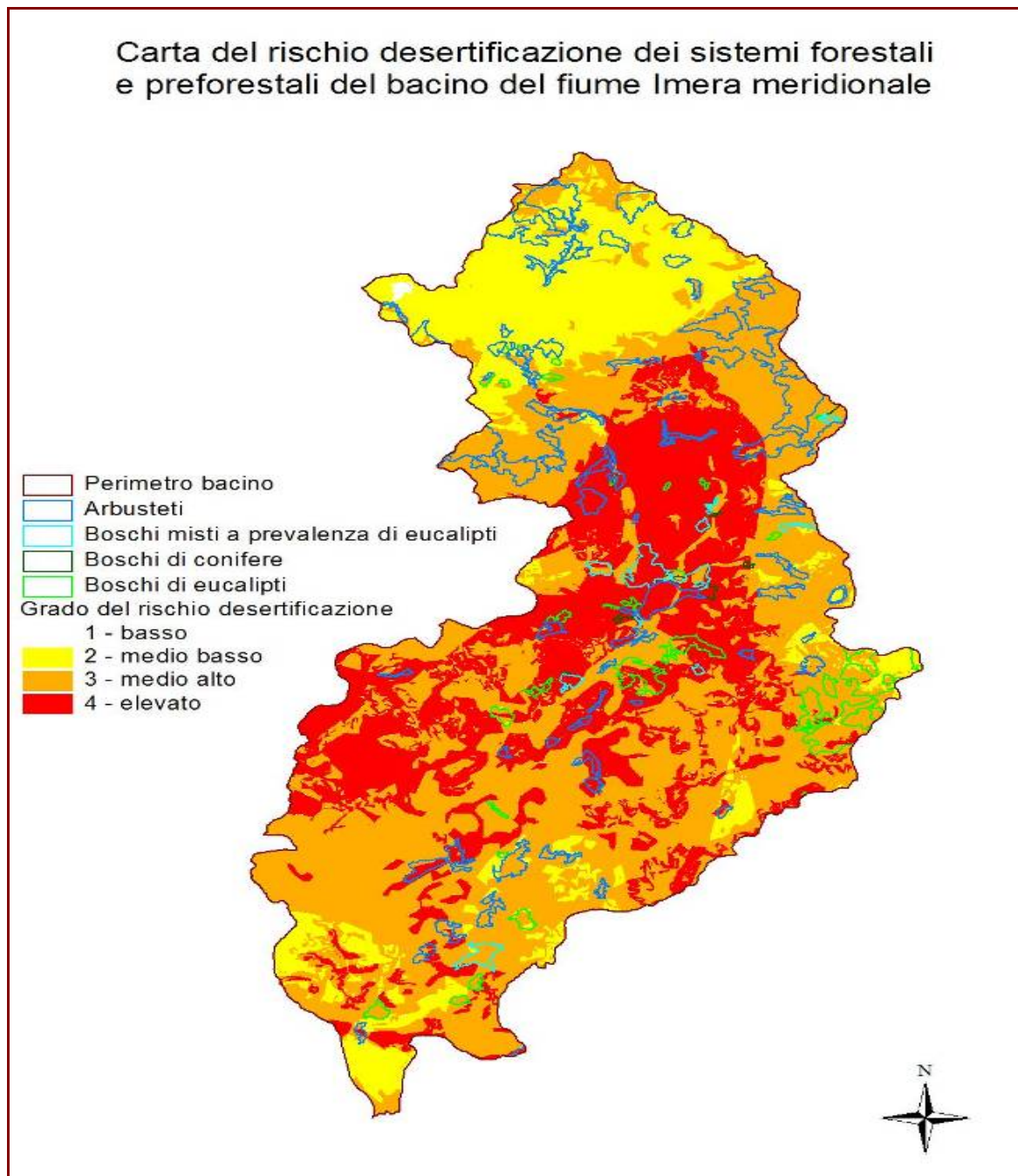




## ANNEXE 6.6 - CARTE DU RISQUE DE DÉSERTIFICATION DU BASSIN DE L'IMERA MÉRIDIONAL



**ANNEXE 6.7 - CARTE DU RISQUE DE DÉSERTIFICATION DES  
SYSTÈMES FORESTIERS ET PRÉFORESTIERS DU BASSIN DE  
L'IMERA MÉRIDIONAL.**





## ***Chapitre 7 - Monitoring de la salinité du sol suite à l'irrigation avec des eaux à degré de salinité divers***

***Pr Carmelo Dazzi***

***Département d'Agronomie Environnementale et Territoriale, Université des Études de Palerme***

### **7.1 Introduction**

Parmi les urgences environnementales directement liées aux mouvements de désertification, il faut considérer, par leur dangerosité, les processus de salinisation secondaire des sols dus à l'activité anthropique, qui revêtent une importance, scientifique et pratique croissante d'une année sur l'autre (*Dazzi*, 2002; 2006). Malgré les expériences négatives réalisées dans diverses régions du monde, la salinisation des zones d'irrigation, parfois des zones environnantes, ne diminue pas mais augmente (*Szabolcs*, 1994). Des perspectives à 2020 sur le développement de l'irrigation et de la salinisation secondaire qui en découle, indiquent que les évolutions dans l'incrément des zones d'irrigation et des zones salinisées suivent une tendance de développement presque parallèle et que les territoires à salinisation secondaire sont plus étendus que les territoires d'irrigation car les processus de salinisation secondaire touchent en général une superficie plus importante par rapport à celle d'irrigation (*Szabolcs*, 1998).

Au cours des dernières décennies, les zones d'irrigation dans les Pays du bassin méditerranéen ont subi un incrément estimé à près de 20% (*Pla Sentis*, 1996). Elles sont en général situées à proximité de zones à forte concentration urbaine et industrielle, où une grande partie de l'eau de bonne qualité est consommée. Il en découle que, à des fins d'irrigation, on utilise des eaux de basse qualité (principalement salines, des eaux usées urbaines ou des effluents industriels). À cela s'ajoute la surexploitation des nappes le long des plaines côtières, qui provoque fréquemment des intrusions d'eaux marines ainsi que le recours excessif à des engrais et pesticides qui, utilisés en grande quantité en agriculture d'irrigation, peuvent contaminer les eaux de surface ou de nappe à usages agricoles (et civils)

Ces problèmes s'aggraveront par effet des changements climatiques globaux prévus dans un futur proche. En Europe méditerranéenne, on pense que ces changements conduiraient à un incrément de l'indice d'aridité qui, en influençant le régime d'humidité et le métabolisme salin des sols, finirait par déterminer une lixiviation mineure et une plus grande salinisation, jusqu'à doubler, dans les 40 ans qui viennent, les zones touchées par la salinité (*Szabolcs*, 1996).

C'est probablement en Sicile que le problème de la salinisation secondaire des sols par irrigation se fait le plus sentir, ceci est à imputer non seulement à la nature des sols qu'on y trouve mais aussi aux niveaux de salinité des eaux disponibles pour irriguer.

La dangerosité de l'utilisation d'eaux salines et leur forte influence dans les processus de salinisation secondaire des sols ont été démontrées par des études menées à partir de 1960 par le Département d'Agronomie Environnementale et Territoriale de l'Université des Études de Palerme, avec une série d'expérimentations sur des zones siciliennes où le problème de la salinité du sol induite par des eaux d'irrigation est particulièrement fréquent (*Ballatore et al.*, 1968a; 1968b; 1968c; 1968d; *Fierotti et al.*, 1968a; 1968b; 1999). Ces résultats ont été récemment confirmés par une étude qui a porté sur quelques sols repères dans les zones d'irrigation de la plaine de Licata (*Indorante et al.*, 2001) et témoignent que, dans les régions méridionales et insulaires d'Italie, à été chaud-aride, où les productions agricoles dépendent largement de l'irrigation, l'utilisation de ces eaux représente la cause de salinisation et sodisation de sols, à savoir de processus de stockage et de redistribution des sels dans les différents horizons du profil du sol (*Chhabra*, 1996).

## **7.2 La proposition d'enquête**

Malgré les études menées, la problématique liée à l'irrigation est très complexe et, à ce jour encore, tous les mécanismes d'action sur le sol et sur la végétation ne sont pas bien connus, pouvant varier fortement non seulement d'un lieu à l'autre et d'un

type pédologique à un autre, mais souvent, aussi dans un même sol (*Dazzi et al.*, 2005).

Les expériences effectuées ont montré comment, dans les différentes conditions pédologiques, climatiques et végétales, il peut être recouru à l'utilisation d'eaux anormales après réalisation d'études rigoureuses et approfondies visant à définir les effets sur les sols (*Dazzi et al.*, 2002).

Un important travail a été fait, mais il reste encore beaucoup à faire. Dans cette optique, l'Observatoire des Eaux de l'Agence Régionale pour les Déchets et les Eaux intervient par la réalisation d'un «Projet Pilote de Lutte contre la Sécheresse et la Désertification» dans le cadre de l'Accord de Programme avec le Ministère de l'Environnement, de l'Aménagement et du Milieu marin et le Comité National pour la Lutte contre la Sécheresse et la Désertification. Ce programme s'inscrit dans une série d'opérations dirigées par l'Observatoire dans le cadre du système de monitoring du Bureau d'actions de lutte et de mitigation en matière de sécheresse et de désertification menées par l'Administration Régionale. L'un des thèmes étudiés dans ce domaine concerne le «monitoring de la salinité du sol suite à l'irrigation avec des eaux à degrés divers de salinité», développé par convention signée entre l'Observatoire des Eaux et le Département AAT, Chaire de Pédologie, de l'Université de Palerme. Cette opération, développée sur la période juillet 2007-septembre 2008, a été menée sur une zone particulièrement significative de la plaine de Licata (AG).

Avant de poursuivre dans le rapport, il faut souligner que des enquêtes destinées à définir les relations eau/sol nécessitent une dimension espace/temps largement supérieure à celle considérée dans cette opération de monitoring (un an d'observations et un seul site d'enquête).

Autrement dit, il faut que des enquêtes à tels objectifs soient menées sur des types de sol le plus possible diversifiés et sur une période d'au moins dix ans (afin de définir ladite «année normale» - *Soil Survey Staff*, 2006), pour pouvoir obtenir des indications de valence scientifique et applicative sûres.

### 7.3 Matériels et méthodes

En fonction des indications du protocole d'accord, une série d'excursions préalables a permis de trouver dans la plaine de Licata une situation type, représentative de la réalité serricole où, plus que dans d'autres structures, existent d'évidents processus de salinisation secondaires induits par l'utilisation d'eaux salines (*Indorante et al.*, 2001). Il a notamment été choisi l'exploitation Cammilleri (située en section «Fiume Vecchio», Fig. 7.1) qui s'est avérée particulièrement adaptée aux fins de monitoring car, au-delà d'être représentative de la réalité serricole de la plaine de Licata, elle permettait de définir trois dispositifs expérimentaux typiques de l'agriculture protégée et caractérisés par des paramètres environnementaux, des méthodologies agronomiques et des espèces végétales cultivées plus homogènes.



Fig. 7.1 - Localisation de l'exploitation objet de l'opération de monitoring.

L'un des trois dispositifs a été géré selon des procédures agricoles qui représentent une modalité innovante dans la zone d'expérimentation et a servi de «contrôle» par rapport aux deux autres qui ont connu respectivement l'utilisation d'eaux salines (saline) provenant d'un puits de l'exploitation (Fig. 7.2) et d'eaux douces (douce), utilisant des eaux de pluie opportunément collectées pendant la saison hivernale (Fig. 7.3).



Fig. 7.2 - Puits de l'exploitation. Au deuxième plan, citerne de collecte des eaux de pluie.





Fig. 7.3 - Citerne de collecte des eaux de pluie.

Pour l'évaluation dans le temps de l'évolution de la salinité des eaux d'irrigation utilisées et de l'évolution de la salinité en surface et dans le sous-sol, suite à l'irrigation, dans chaque dispositif et tous les quinze jours, il a été prélevé des échantillons d'eaux utilisées et des échantillons de sol (en double sur chaque dispositif expérimental).

Les eaux ont permis de déterminer les paramètres suivants:

- Conductivité électrique (CE);
- Ion calcium ( $\text{Ca}^{++}$ );
- Ion magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ );
- Ion potassium ( $\text{K}^{+}$ );
- Ion sodium ( $\text{Na}^{+}$ );
- SAR (Sodium Adsorption Ratio).

Les échantillons de sol ont permis de déterminer les paramètres suivants:

- Réaction (pH);
- Conductivité électrique (CE);
- Ion calcium ( $\text{Ca}^{++}$ );
- Ion magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ );
- Ion potassium ( $\text{K}^{+}$ );
- Ion sodium ( $\text{Na}^{+}$ ).

La réaction a été mesurée potentiométriquement sur une suspension 1:2.5 (sol:  $\text{H}_2\text{O}$ ) à l'aide d'un pH-mètre 691 à électrode de verre (AC 9101). La conductivité électrique a été mesurée sur une suspension 1:5 (sol:  $\text{H}_2\text{O}$ ) à l'aide d'un conductimètre Orion 101 (à cellule 012001). Les ions ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ) ont été déterminés à l'aide d'un chromatographe à ions Dionex 120D.

Le sol objets de l'enquête a été étudié par ouverture d'un profil pédologique puis caractérisé et classé selon les méthodes les plus connues et courantes (Soil Survey Staff, 2006). Pour celui-ci, au-delà des paramètres précédemment cités, ont été aussi déterminés la texture (méthode de la pipette après dispersion dans le l'hexamétaphosphate de sodium) et le carbone organique (oxydation au permanganate de potassium).

#### **7.4 Le sol objet d'enquête**

Pour déterminer pleinement les caractéristiques des sols objets du monitoring, au voisinage immédiat des trois dispositifs expérimentaux a été ouvert un profil de sol qui a été décrit et échantillonné dans ses horizons génétiques et jusqu'à une profondeur de 160 centimètres (Fig. 7.4 et 7.5).

Dans le cas présent, le sol étudié s'est formé sur les crues récentes du fleuve Salso et évolue sur une morphologie plane, à pierrosité et rochiosité absente et drainage externe imparfait. Du point de vue pédogénétique, il présente 6 horizons: Ap1, Ap2, Bw1, Bw2, 2BW1, 2Bw2.

En résumé, le sol présente une texture franco-sableuse dans les deux premiers horizons (Ap1 et Ap2), à teneurs en sable peu supérieures à 70% et en argile et limon respectivement inférieures à 20% et 10%. Les horizons diagnostiques suivants (Bw1, Bw2 et 2Bw1) présentent par contre une texture franco-argilo-sableuse jusqu'à une profondeur de 130 cm. Ici, la teneur en argile atteint 25% alors qu'il existe un incrément du pourcentage de limon (environ 14%) et un décrétement du pourcentage de sable (environ 60%). Le dernier horizon, enfin, présente des caractéristiques de texture de sol franc faisant enregistrer respectivement 29,41%, 18,25% et 52,34% d'argile, limon et sable. Le long du profil, la forme des agrégats va de polyédrique subangulaire dans les horizons A, à polyédrique angulaire dans les horizons suivants, les dimensions varient de très fins à moyens selon la même évolution. Dans l'ensemble, le sol s'avère peu plastique et peu adhérent, avec faible présence de pores et drainage interne normal à lent. À souligner, la présence de concrétions de  $\text{CaCO}_3$  à environ 120 cm de profondeur.



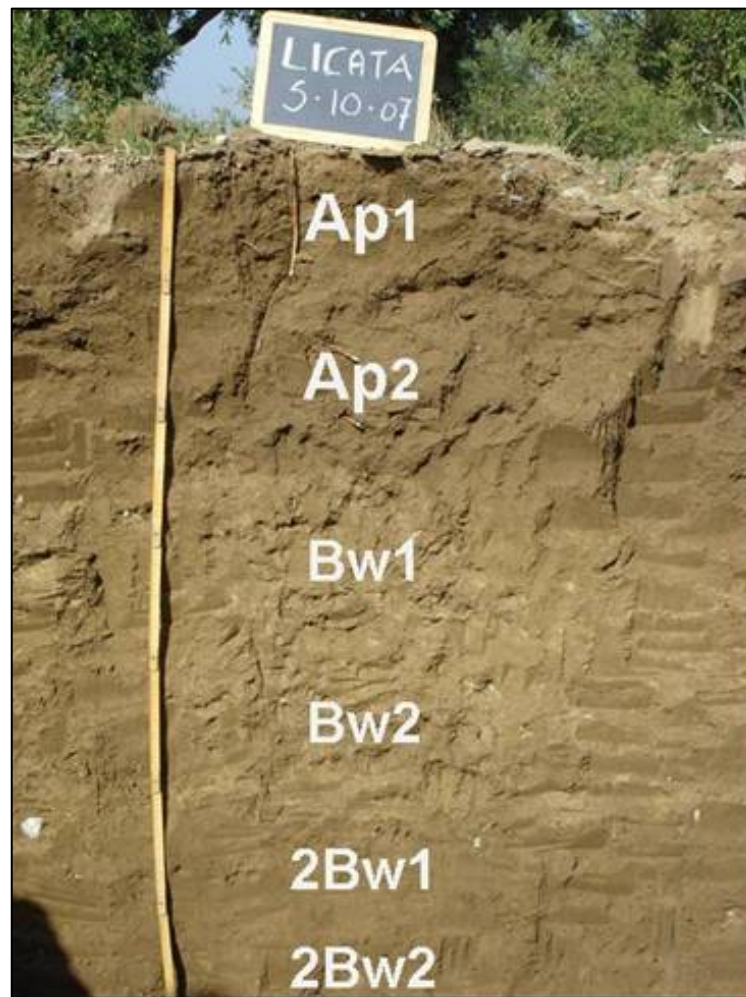


Fig. 7.4 - Morphologie du profil représentatif des sols objets d'enquête.



Fig. 7.5 - Station du profil représentatif des sols objets d'enquête.  
Au deuxième plan, l'un des dispositifs expérimentaux.

Concernant les caractéristiques chimiques, le sol présente une réaction subalcaline, à pH variable de 7,9 à 8,3; CSC moyenne, saturée en ions calcium et conductivité électrique moyenne de 431  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans les premiers horizons et qui augmente progressivement le long du profil restant, jusqu'à la valeur de 927  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans le dernier horizon. La teneur en carbone organique décroît régulièrement à l'augmentation de la profondeur (de 4,09  $\text{g Kg}^{-1}$  à 3,5  $\text{g Kg}^{-1}$ ), indiquant ainsi la façon dont le sol a subi une certaine évolution pédologique.

### 7.5 Les résultats du monitoring

Parallèlement aux observations sur les eaux d'irrigation et sur les sols à l'intérieur des dispositifs expérimentaux, avec la collaboration de l'Office Hydrographique Régional, il a été aussi mené une enquête sur l'évolution climatique

dans la zone d'étude, pour vérifier d'éventuelles relations entre évolution climatique et caractéristiques des eaux utilisées pendant le monitoring.

L'analyse de l'évolution climatique, sur la base des données de température et de pluviosité relatives à la période juin 2007-juin 2008 de la station de Licata et de Ponte dei Drasi met en évidence une température moyenne maximale mensuelle respectivement de 24.4°C et 22.9°C, et une température moyenne minimale mensuelle de 14.8°C et 11.7°C (Fig. 7.6 et 7.7).

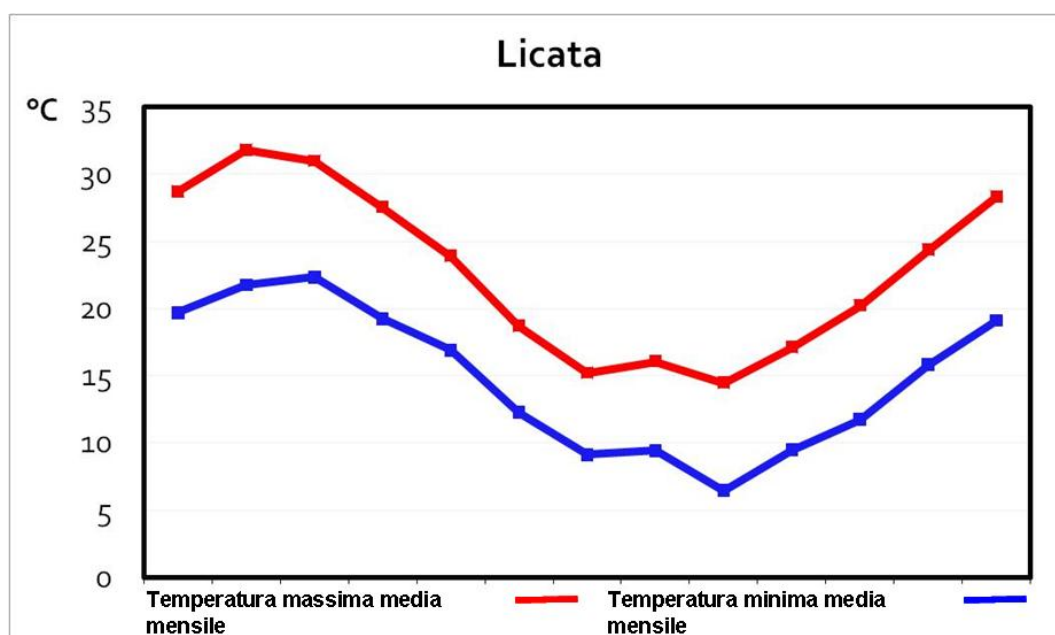


Fig. 7.6 - Licata: evoluzione delle temperature medie massime e minime durante il periodo d'indagine.

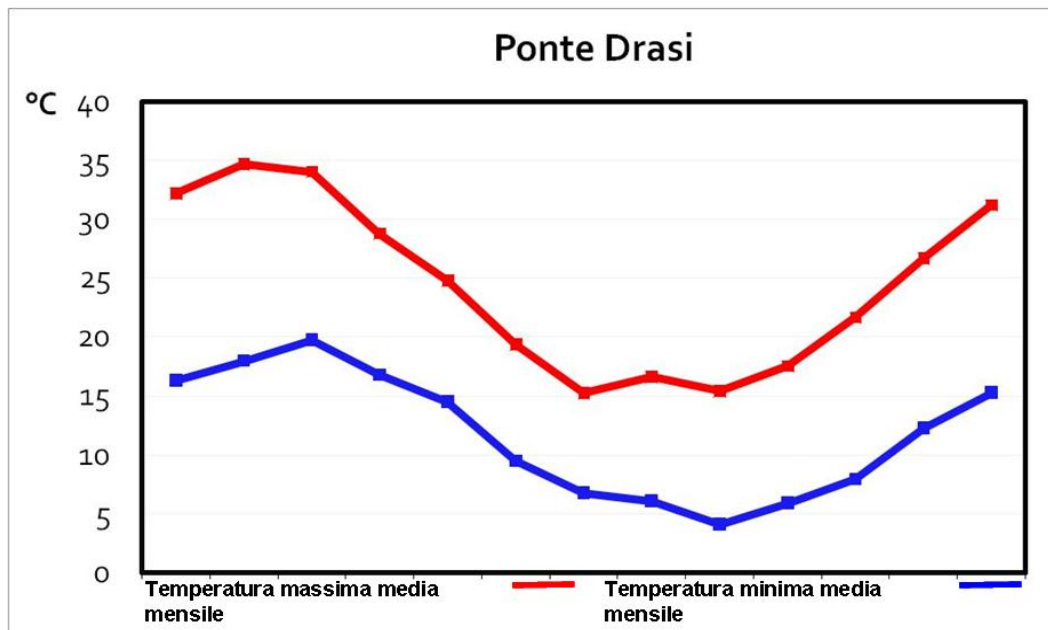


Fig. 7.7 - Ponte Drasi: évolution des températures moyennes maximales et minimales pendant la période d'enquête.

Les valeurs de températures maximales (Fig. 7.6 et 7.7) sont atteintes en juillet dans les deux stations, de 31.8°C et 34.7°C, tandis que les valeurs minimales sont atteintes en février (6.4°C et 4.1°C).

Quant aux précipitations, le mois le plus pluvieux s'avère décembre, avec respectivement 4.1 mm et 2.6 mm à Licata et Ponte dei Drasi, alors que les mois de juillet et août 2007 et juin 2008 sont complètement secs pour les deux stations (Fig. 7.8 et 7.9).

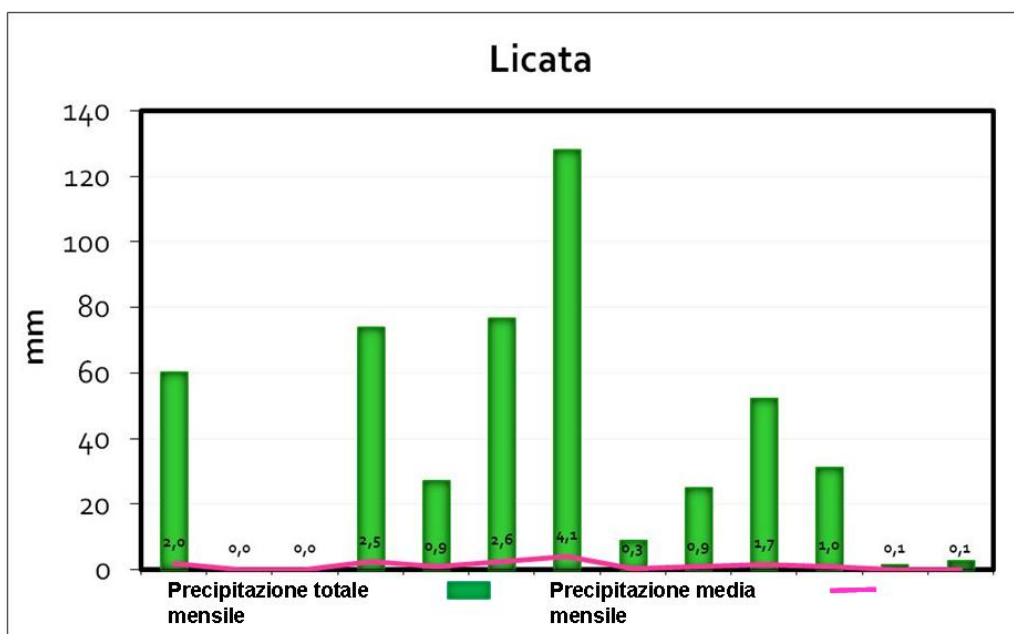


Fig. 7.8 - Licata : évolution des précipitations pendant la période d'enquête.

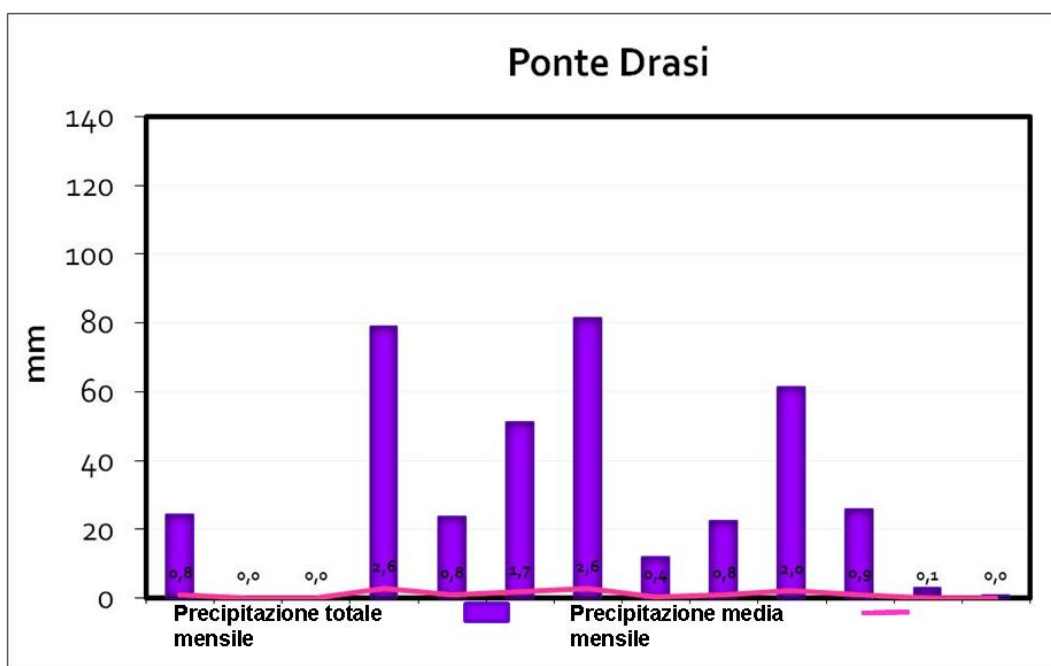


Fig. 7.9 - Ponte Drasi : évolution des précipitations pendant la période d'enquête.

### 7.5.1. Les eaux d'irrigation

Tel qu'indiqué ci-dessus, sur les eaux utilisées pour l'irrigation (*contrôle, saline, douce*), il a été déterminé la conductivité électrique (CE), les ions calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ), potassium ( $\text{K}^{+}$ ), sodium ( $\text{Na}^{+}$ ) et le SAR (*sodium adsorption ratio*), indice synthétique qui montre le risque l'alcalinisation que l'utilisation d'une eau d'irrigation donnée entraîne pour le sol. Les évolutions qu'ont fait enregistrer ces paramètres pendant la période de monitoring sont indiquées ci-après.

- Ion sodium ( $\text{Na}^{+}$ ): présente une évolution décroissante (Fig. 7.10), qui s'avère importante pour l'eau utilisée dans le contrôle (avec des valeurs qui partent d'environ 800  $\text{mgKg}^{-1}$ ) et moins marquée tant pour l'eau douce (avec des valeurs à partir de 250  $\text{mgKg}^{-1}$  environ) que pour l'eau saline (avec des valeurs à partir de 800  $\text{mgKg}^{-1}$  environ).

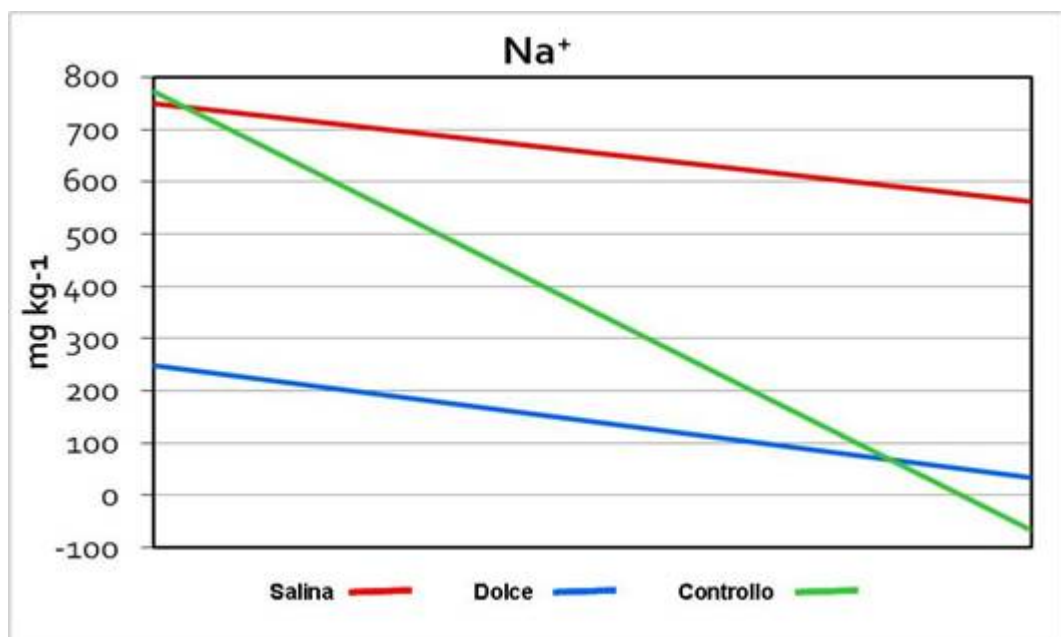


Fig. 7.10 - Évolution des concentrations de l'ion sodium dans les eaux d'irrigation.

- Ion potassium ( $K^+$ ): présente une évolution décroissante (Fig. 7.11), presque parallèle pour l'eau utilisée dans le contrôle (avec des valeurs qui partent d'environ  $9 \text{ mgKg}^{-1}$ ) et pour l'eau douce (avec des valeurs à partir de  $11 \text{ mgKg}^{-1}$  environ); la tendance en décrement s'avère moins marquée pour l'eau saline (avec des valeurs maximales à partir de  $9 \text{ mgKg}^{-1}$  environ et minimales de  $5 \text{ mgKg}^{-1}$ ).
- Ion magnésium ( $Mg^{++}$ ): dans l'eau douce, le magnésium présente des valeurs très basses ( $5\text{-}10 \text{ mgKg}^{-1}$ ) et quasi constantes pendant toute la période de monitoring (Fig. 7.12). Tel n'est pas le cas pour le contrôle et pour l'eau saline: le magnésium fait enregistrer dans ces cas des évolutions très fortement décroissantes pour le contrôle (avec des valeurs à partir de  $210 \text{ mgKg}^{-1}$  environ) et modérément décroissantes pour l'eau saline (avec des valeurs à partir de  $210 \text{ mgKg}^{-1}$  environ et jusqu'à  $140 \text{ mgKg}^{-1}$ ).

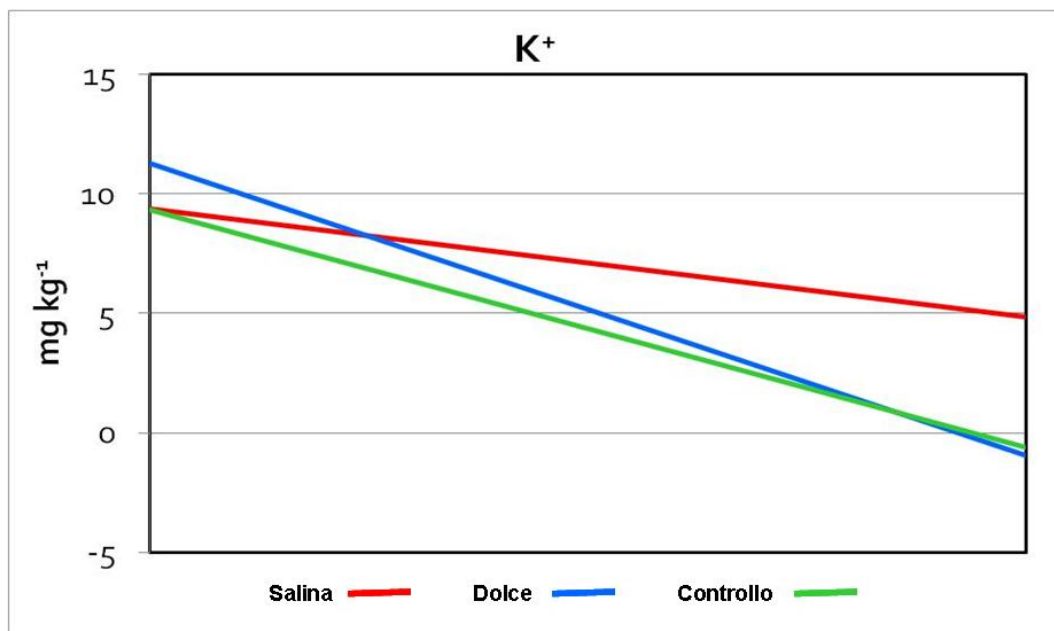


Fig. 7.11 - Évolution des concentrations de l'ion potassium dans les eaux d'irrigation.



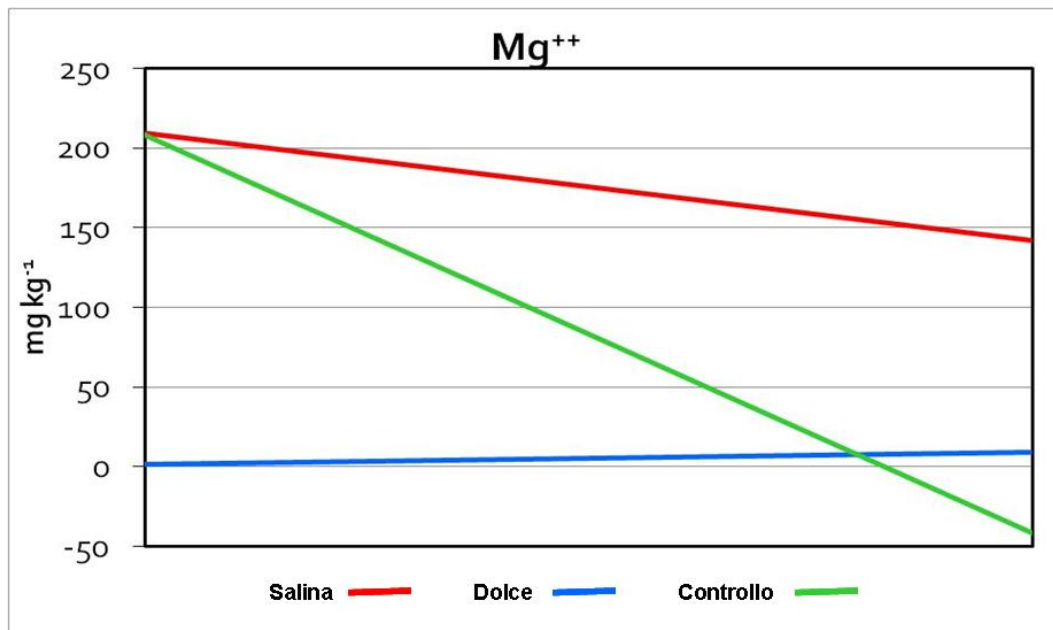


Fig. 7.12 - Évolution des concentrations de l'ion magnésium dans les eaux d'irrigation.

- Ion calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ): l'évolution qu'il a faite enregistrer s'avère comparable à celle du magnésium (Fig. 7.13). Dans l'eau douce, le calcium présente des valeurs basses ( $80\text{-}50 \text{ mgKg}^{-1}$ ) et en très léger décrétement pendant la période de monitoring. Pour le contrôle sont enregistrées des évolutions fortement décroissantes (avec des valeurs partant d'environ  $430 \text{ mgKg}^{-1}$ ); pour l'eau saline, modérément décroissantes (avec des valeurs à partir de  $440 \text{ mgKg}^{-1}$  environ et jusqu'à  $310 \text{ mgKg}^{-1}$ ).



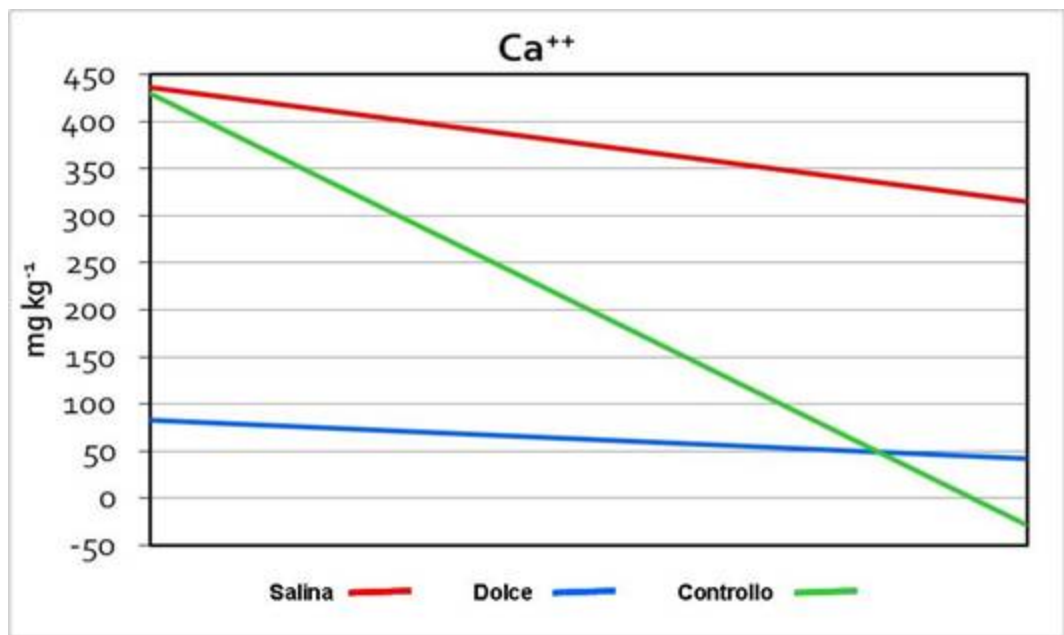


Fig. 7.13 - Évolution des concentrations de l'ion calcium dans les eaux d'irrigation.

- Sodium Adsorption Ratio (SAR): le monitoring de l'évolution du SAR des eaux utilisées pour l'expérimentation (Fig. 7.14) met en évidence des tendances décroissantes dans le cas de l'eau douce et du contrôle. Les valeurs s'étendent de maximales d'environ 40 à des minimales de près de 10 (à souligner que des valeurs de SAR supérieures à 20 indiquent un risque d'alcalinisation des sols très élevé). L'eau saline fait enregistrer une évolution au cours de la période étudiée en léger décrétement avec des valeurs de SAR qui oscillent entre près de 40 et près de 35 (toujours très supérieures à la valeur seuil de 20).
- Conductivité électrique (CE): la *tendance* qu'a fait enregistrer la CE (Fig. 7.15) s'avère en augmentation pour l'eau saline (de près de 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à près de 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). L'eau douce et le contrôle montrent une évolution en diminution (respectivement de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à près de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et de près de 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à près de 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

En mettant en relation l'évolution de la pluviosité de la station de Licata avec les valeurs de conductivité électrique de l'eau saline (Fig. 7.16), à savoir de l'eau du puits de l'exploitation, dont la quantité et la qualité sont influencées par le régime des pluies, on constate une certaine relation entre évolution de la pluviosité et valeurs de conductivité (qui dépendent de la quantité des sels présents et donc des ions). En général, à une période pluvieuse correspond une diminution de la conductivité et inversement.

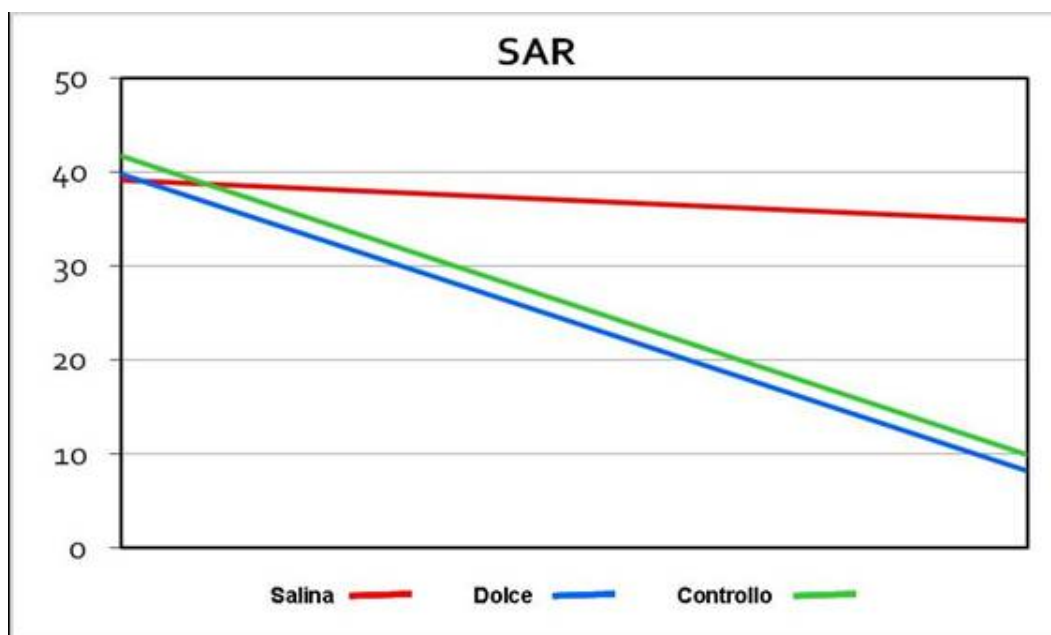


Fig. 7.14 - Évolution des valeurs du SAR dans les eaux d'irrigation.

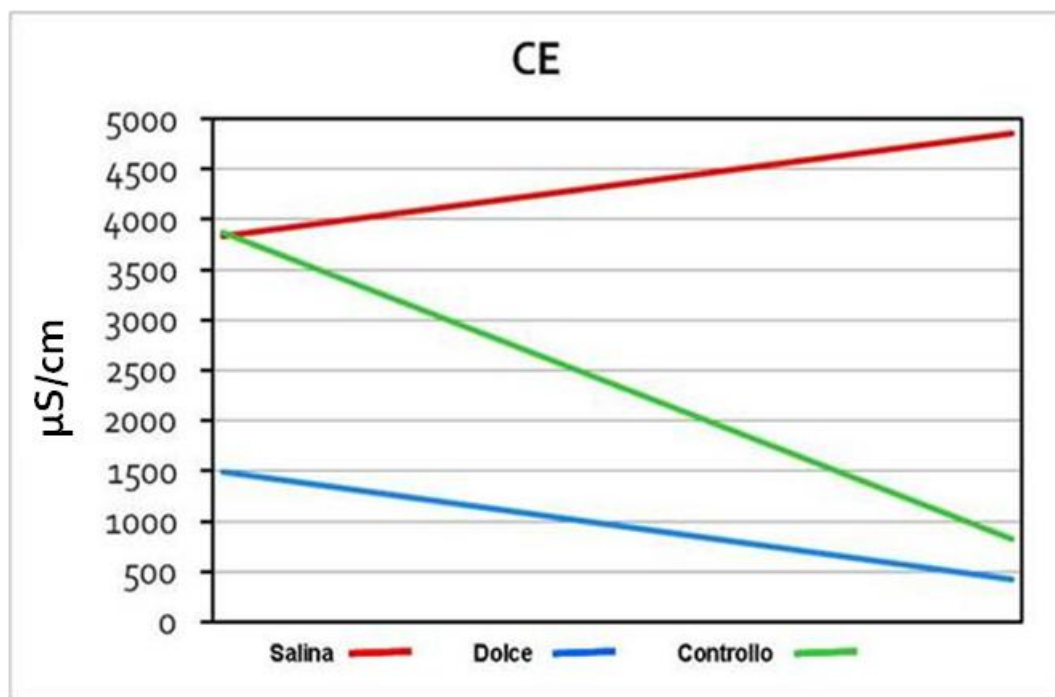


Fig. 7.15 - Évolution des valeurs de la CE dans les eaux d'irrigation.

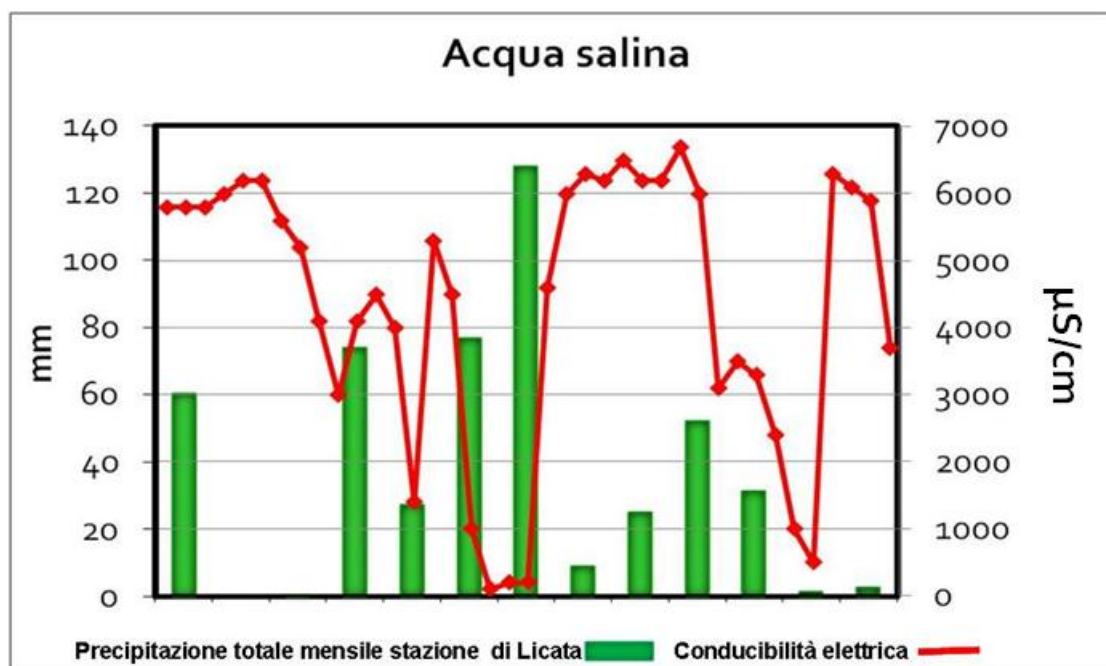


Fig. 7.16 - Relations entre évolution de la pluviosité à Licata et conductivité de l'eau saline.

### 7.5.2 Le sol

Tel qu'indiqué ci-dessus, pour évaluer dans le temps l'évolution de la salinité dans le sol suite à l'irrigation, chaque dispositif expérimental (contrôle, saline, douce) a fait l'objet, tous les quinze jours, de doubles prélèvements de sol, superficiel comme profond. Ils ont permis de déterminer la réaction (pH), la conductivité électrique (CE), les ions calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ).

- Réaction (pH): sur la période de monitoring, la réaction a fait enregistrer des valeurs de subalcalines à neutres, avec une évolution décroissante aussi bien en surface qu'en sous-sol (Fig. 7.17 et 7.18). Dans le sous-sol, les valeurs sont en moyenne supérieures de 0,1 unité par rapport aux valeurs en surface pour les raisons qui ressortent de l'analyse de l'évolution de la concentration des ions.
- Conductivité électrique (CE): l'évolution de la conductivité électrique dans le sol irrigué à l'eau saline (Fig. 7.19 et 7.20) s'avère quasi constante aussi bien en surface (2400-2200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) que dans le sous-sol (environ 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Tel est le cas pour les évolutions de la conductivité électrique dans le sous-sol, tant du contrôle que de celui irrigué à l'eau douce (Fig. 7.20). Par contre, les valeurs de conductivité dans les sous-sols irrigués à l'eau douce et avec le contrôle sont en déclin, ceci pour des raisons évidentes liées à une certaine «lixiviation» déterminée aussi par les bonnes caractéristiques physiques du sol (texture, structure, porosité) et par la bonne capacité d'infiltration qu'il présente en partie superficielle.

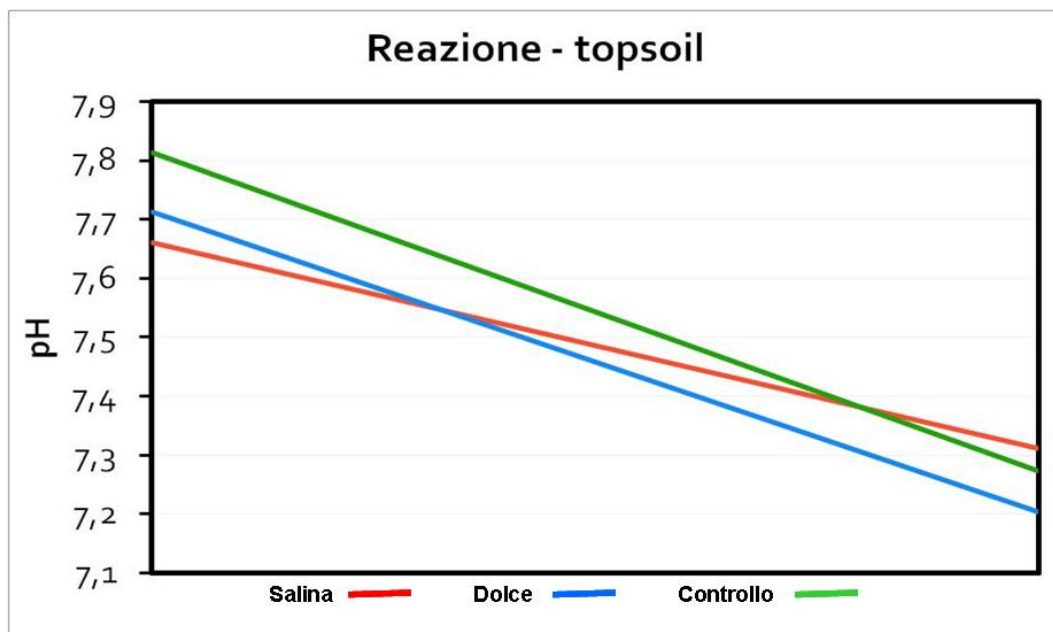


Fig. 7.17 - Évolution de la réaction dans le sous-sol irrigué avec des eaux de différentes qualités.

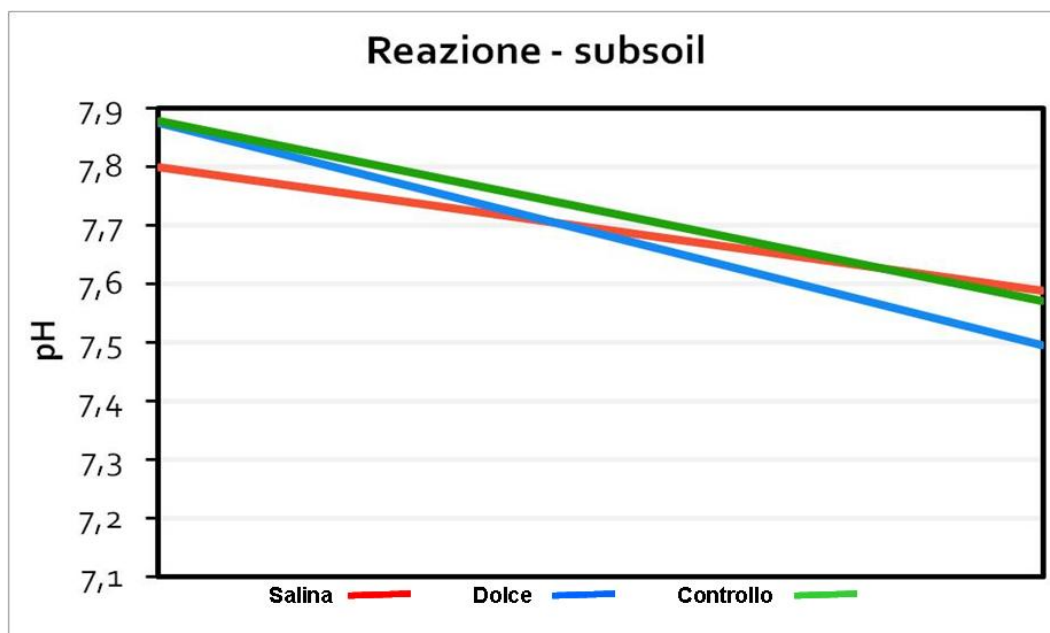


Fig. 7.18 - Évolution de la réaction dans le sous-sol irrigué avec des eaux de différentes qualités.

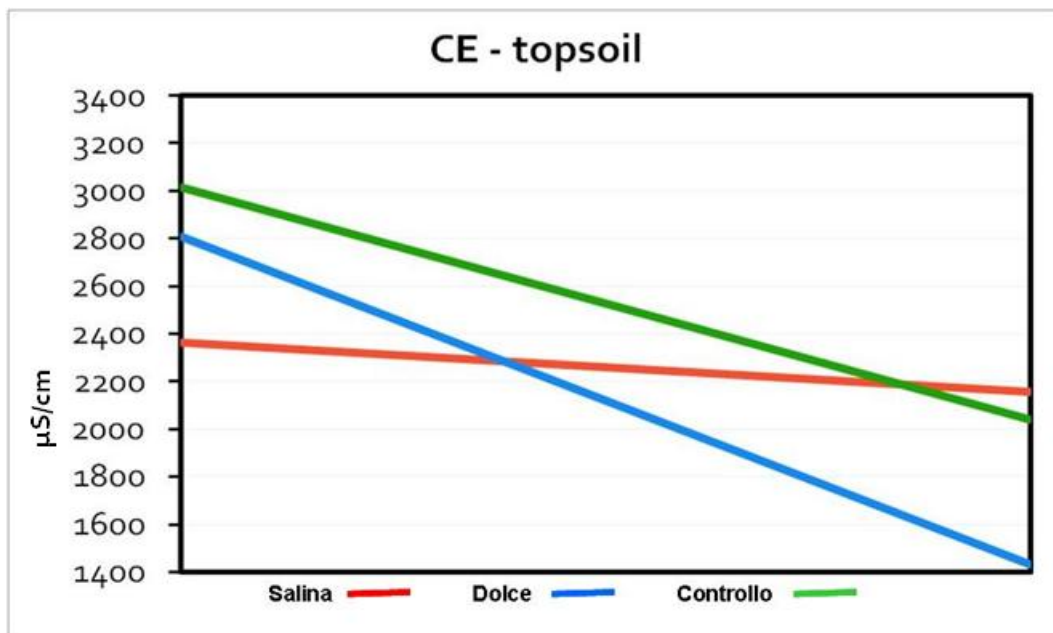


Fig. 7.19 - Évolution de la CE dans le sous-sol irrigué avec des eaux de différentes qualités.

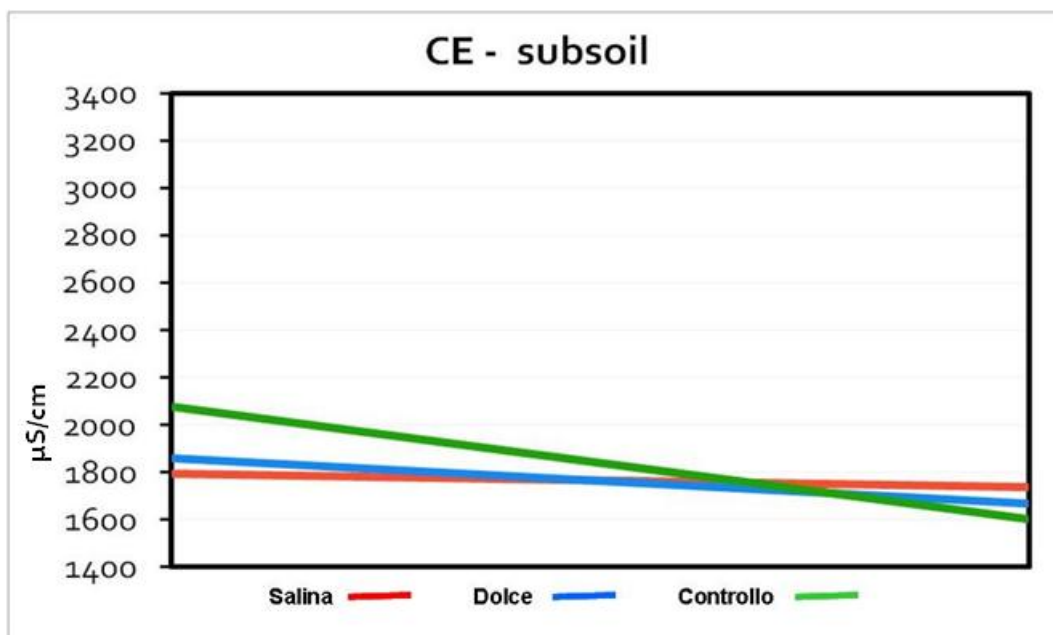


Fig. 7.20 - Évolution de la CE dans le sous-sol irrigué avec des eaux de différentes qualités.

- Ion sodium ( $\text{Na}^+$ ): les évolutions enregistrées dans le sol par l'ion sodium sont particulièrement intéressantes. Il existe notamment dans le sous-sol (Fig. 7.21)

une évolution constante pour l'irrigation à l'eau saline (environ  $135 \text{ mgKg}^{-1}$ ), une évolution décroissante pour l'irrigation avec le contrôle (de près de  $160 \text{ mgKg}^{-1}$  à près de  $140 \text{ mgKg}^{-1}$ ), une évolution croissante pour l'irrigation à l'eau douce (de près de  $130 \text{ mgKg}^{-1}$  à près de  $170 \text{ mgKg}^{-1}$ ). Dans le sous-sol (Fig. 7.22), il existe une évolution quasi constante pour l'irrigation à l'eau saline (environ  $170 \text{ mgKg}^{-1}$ ), des évolutions décroissantes tant pour l'irrigation à l'eau douce (de près de  $185 \text{ mgKg}^{-1}$  à près de  $115 \text{ mgKg}^{-1}$ ) que pour l'irrigation avec le contrôle (de près de  $215 \text{ mgKg}^{-1}$  à près de  $100 \text{ mgKg}^{-1}$ ).

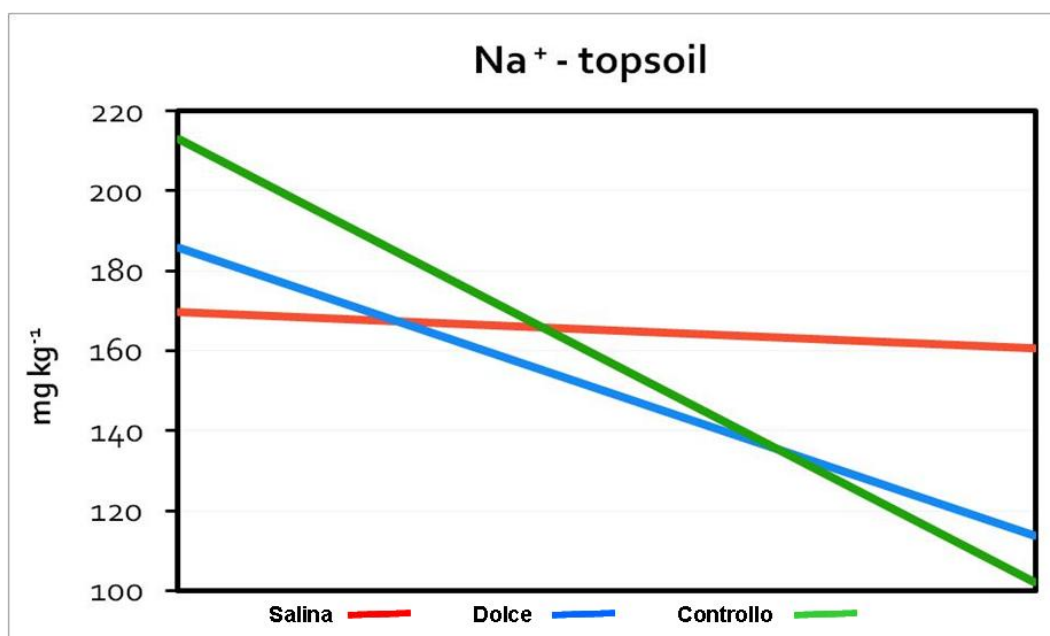


Fig. 7.21 - Évolution de la concentration de l'ion sodium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

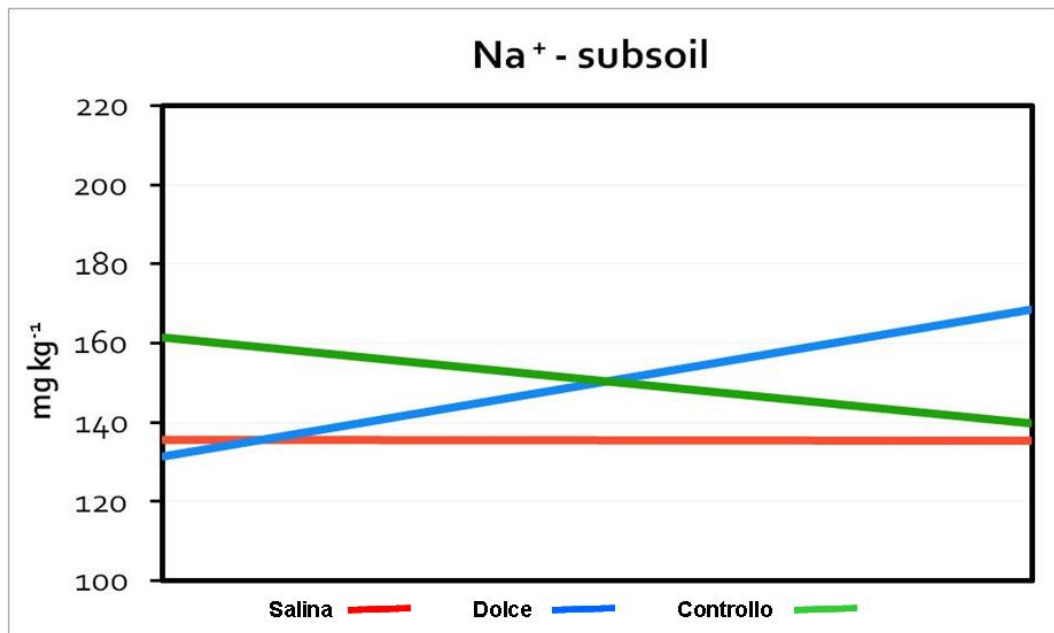


Fig. 7.22 - Évolution de la concentration de l'ion sodium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

L'incrément enregistré dans les teneurs en sodium dans le sous-sol du terrain irrigué à l'eau douce est probablement à imputer à une action défloculante sur les argiles et désagrégeante de la structure qui se manifeste en cas d'utilisation d'eaux douces pour irriguer des terrains à niveau de salinité même non excessifs. Il en résulte une diminution de la perméabilité du sol qui, en dernière analyse, justifie le stockage de sodium.

- Ion potassium (K<sup>+</sup>): l'ion potassium présente une évolution décroissante dans le temps, tant dans le sous-sol qu'en surface (Fig. 7.23 et 7.24).



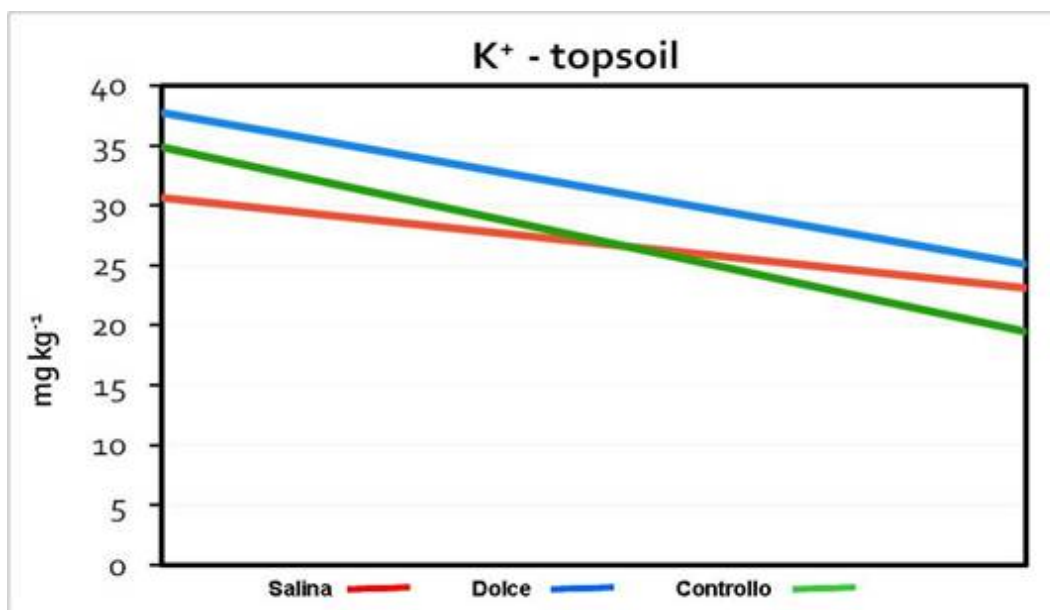


Fig. 7.23 - Évolution de la concentration de l'ion potassium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

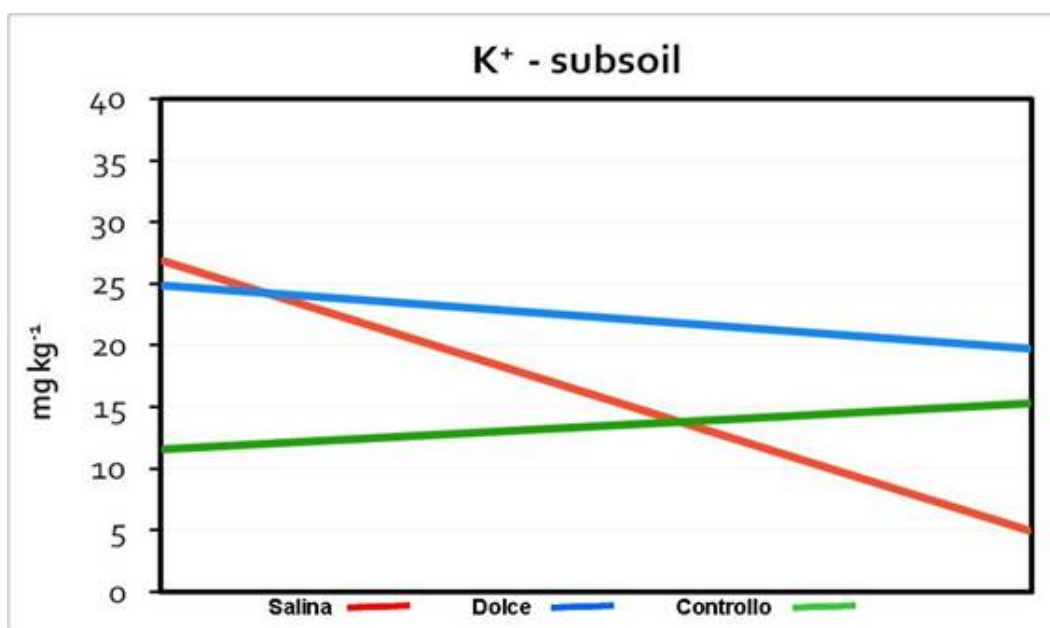


Fig. 7.24 - Évolution de la concentration de l'ion potassium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

Exception faite dans le sous-sol du terrain de contrôle où l'on note un très léger incrément. Les valeurs oscillent entre environ 38 mgKg<sup>-1</sup> et 20 mgKg<sup>-1</sup> en surface et entre environ 25 mgKg<sup>-1</sup> et 5 mgKg<sup>-1</sup> dans le sous-sol.

- Ion magnésium (Mg<sup>++</sup>): l'ion magnésium fait enregistrer des évolutions en contre-tendance par rapport aux autres ions notamment en surface. Ici (Fig. 7.25) les *tendances* sont légèrement au stockage de magnésium dans les trois cas analysés (douce, saline, contrôle) avec des évolutions parallèles et des valeurs variables minimales de près de 32 mgKg<sup>-1</sup> à des maximales de près de 38 mgKg<sup>-1</sup>. Dans le sous-sol (Fig. 7.26), uniquement pour le terrain irrigué à l'eau saline, on obtient une tendance au stockage de cet ion (de 38 mgKg<sup>-1</sup> à 48 mgKg<sup>-1</sup>), car aussi bien pour l'irrigation à l'eau douce que pour le contrôle, l'évolution montre une nette tendance à la diminution (de près de 54 mgKg<sup>-1</sup> à près de 36 mgKg<sup>-1</sup>).

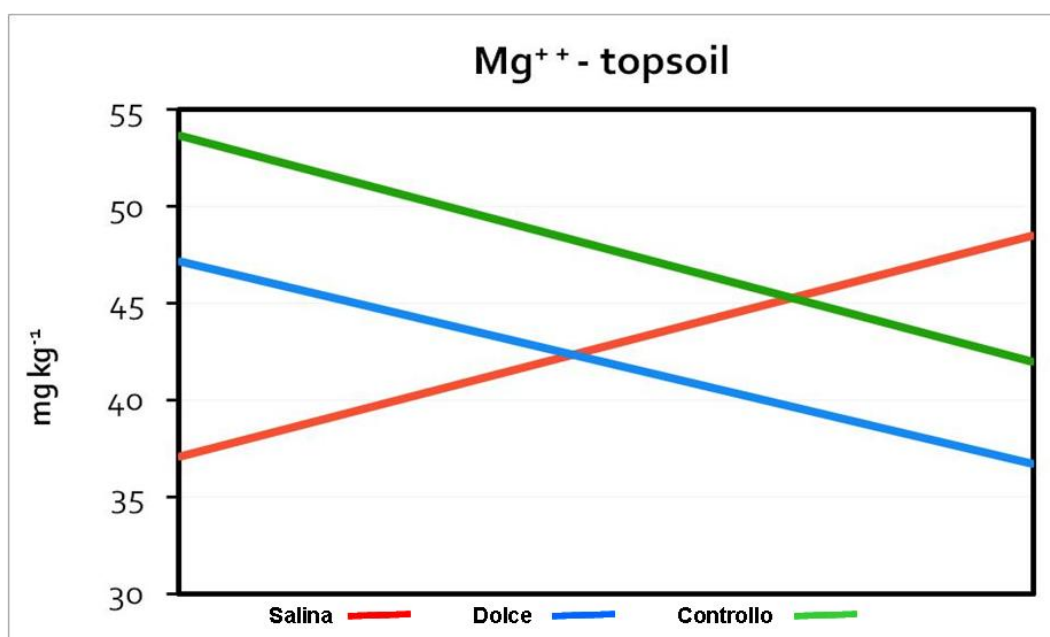


Fig. 7.25 - Évolution de la concentration de l'ion magnésium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

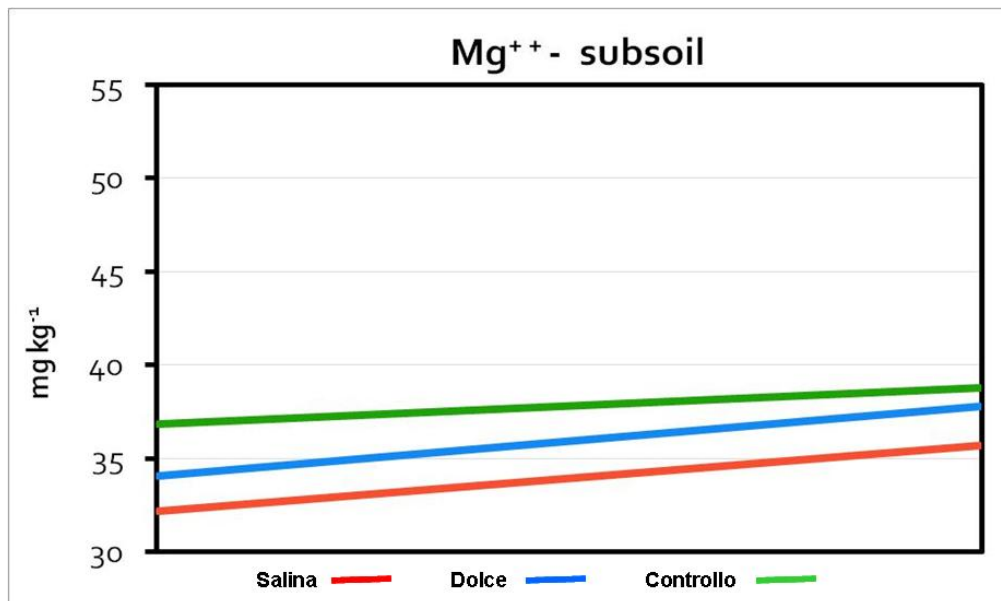


Fig. 7.26 - Évolution de la concentration de l'ion magnésium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

- Ion calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ): dans le sous-sol (Fig. 7.28), l'évolution de l'ion calcium montre des valeurs constantes mais variables autour de 40 mgKg-1 pour les sols de contrôle et autour de 200-220 mgKg-1 tant pour les sols irrigués à l'eau douce qu'à l'eau saline. Les évolutions en surface sont différentes (Fig. 7.27): avec l'eau saline, on note une tendance au stockage de calcium (de valeurs minimales de 250 mgKg-1 à des maximales de 350 mgKg-1).

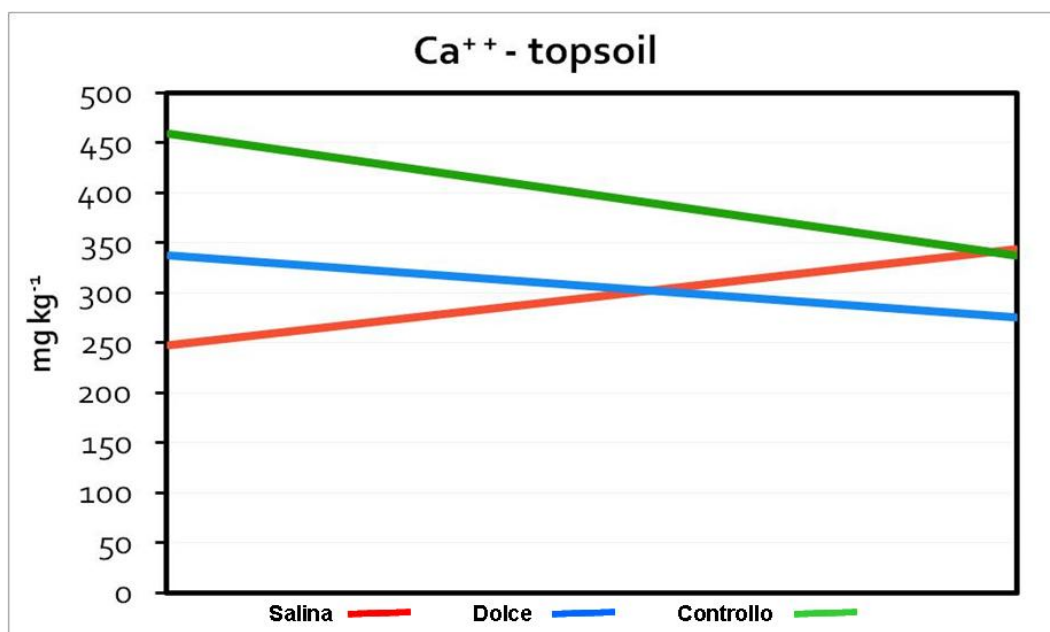


Fig. 7.27 - Évolution de la concentration de l'ion calcium en surface de sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

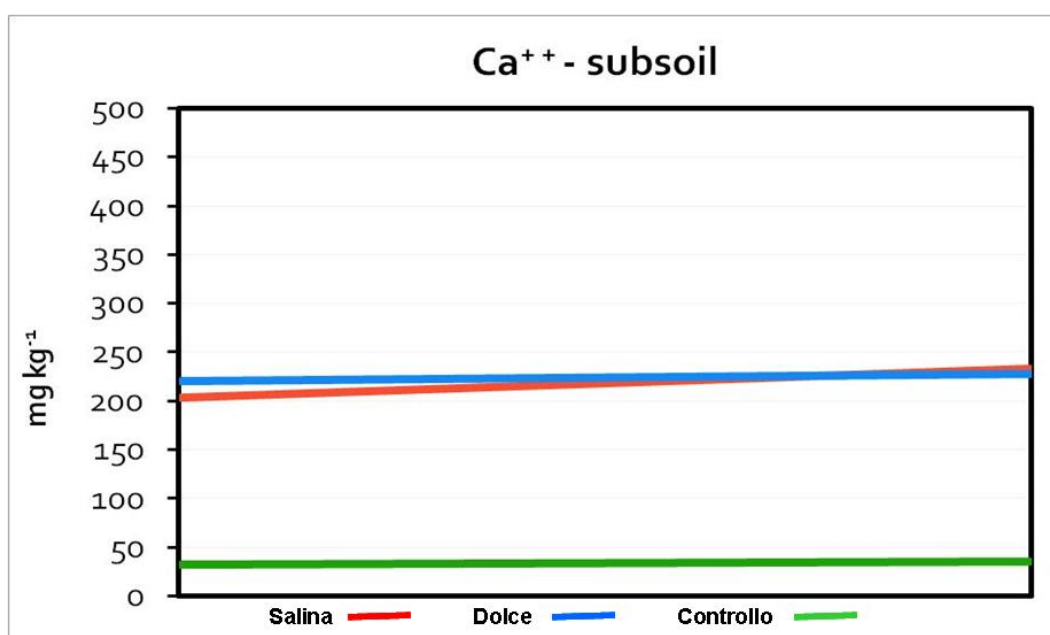


Fig. 7.28 - Évolution de la concentration de l'ion calcium dans le sous-sol irrigué avec des eaux de qualités différentes.

Avec de l'eau douce, la tendance est à la diminution (valeurs à partir d'environ 340 mgKg<sup>-1</sup> à environ 280 mgKg<sup>-1</sup>), qui devient plus évidente pour l'irrigation du sol d contrôle (valeurs à partir d'environ 460 mgKg<sup>-1</sup> à environ 340 mgKg<sup>-1</sup>).

## 7.6 Conclusions

L'irrigation, comme on le sait, consiste en l'apport artificiel d'eau au sol qui est en déficit hydrique. Cette pratique simple, répétée dans le temps, même avec des eaux de bonne qualité, entraîne des mutations plus ou moins importantes, non seulement dans les caractéristiques chimiques, physiques, hydrologiques et biologiques, mais dans le bilan morphologique des sols et de l'environnement voisin. Par interaction de l'eau et du sol, les deux sont profondément modifiés : le sol modifie l'eau (Fig. 7.29) et l'eau modifie le sol (Fig. 7.30).

<b>Principaux processus dans le sol, responsables de modifications dans la qualité des eaux:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>L'érosion</u> qui provoque le transport de sédiments en solution et en suspension dans les eaux de ruissellement ;</li> <li>• <u>La lixiviation</u> qui entraîne le transfert d'élément nutritifs, produits chimiques et matière organique soluble dans les eaux de percolation en fonction aussi des cultures présentes;</li> <li>• <u>Le flux d'eau</u> dans les macropores et dans les fissures qui provoque le transfert rapide de l'eau et des polluants de la surface au sous-sol et dans le système de drainage;</li> <li>• <u>La minéralisation</u> accélérée de la matière organique qui entraîne le passage en solution de composés facilement transportables par l'eau (<i>Lal et Stewart, 1994</i>).</li> </ul>

Fig. 7.29 - Modifications des eaux par le sol.

<b>L'intensité des mutations provoquées par les eaux dans le sol dépend de:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>La nature du sol</u>, notamment la granulométrie et l'agrégation ; les plus sensibles à la salinité sont les sols argileux ou à tendance argileuse sur lesquels l'apport continu d'eau provoque de profonds changements dans la couche structurale et dans la composition chimique et physique. Les mutations qui se produisent dans les sols à texture sableuse, dans lesquels les mouvements de lixiviation sont très</li> </ul>

actifs, sont moins importantes;

- Des techniques de culture qui, appliquées en condition d'humidité du sol inhabituelle, peuvent générer des phénomènes plus ou moins graves de compactage des horizons supérieurs du sol et d'altération de la morphologie superficielle avec accentuation consécutive des phénomènes de rétention hydrique;
- Des méthodes d'irrigation qui, si appliquées de façon irrationnelle, comme souvent, provoquent la destruction des éléments structuraux superficiels et le remplissage consécutif des micro- et macropores;
- La qualité des eaux;
- La présence de cultures à divers besoins en eau;
- Des mouvements de l'eau qui, en régime d'irrigation, se répètent à intervalles trop rapprochés.

Fig. 7.30 - Modifications du sol par l'eau.

En faisant abstraction de la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation, du point de vue purement pédologique, on peut affirmer que les sols soumis à l'irrigation, même à des cadences différentes, évoluent comme un nouveau substrat, objet de nouveaux processus physiques, chimiques et biologiques souvent très différents des processus existants dans les mêmes types de sol à régime sec et qui déterminent de nouvelles orientations évolutives et, par conséquent, le développement dans le temps de types de sols, nouveaux et différents de ceux dont ils dérivent (Fig. 7.31).

**Modifications du sol par l'eau à caractère pédogénétique:**

- Changement du pédoclimat, à savoir des régimes d'humidité et de température du sol;
- Éventuels phénomènes érosifs principalement en fonction de la méthode d'irrigation, de la pente et de la stabilité structurale du sol;
- Éventuels phénomènes d'éluviation et dispersion des colloïdes;
- Processus liés à la lixiviation avec formation d'horizons de stockage, argiliques, très souvent enrichis de sels solubles et/ou de carbonates secondaires;
- Effets sur la texture;
- Apport de nouveaux éléments contenus dans les eaux (sels ou autre).

Fig. 7.31 - Principaux effets provoqués par l'eau sur le sol à caractère pédogénétique.

Mais lorsque, à des fins d'irrigation, des eaux salines sont utilisées, parallèlement aux aspects cités, des processus de dégradations sont provoqués dont

l'intensité dépend, outre de la diversité pédologique, de la qualité et de la quantité de sels dissouts et de certains autres facteurs environnementaux, avant tout climatiques (Dazzi, 2006).

Dans les sols salins et en conditions typiques de semi-aridité de l'environnement méditerranéen, une période estivale, chaude et sèche durant laquelle il est impératif de recourir à l'irrigation, souvent en utilisant des eaux anormales, est suivie d'une saison pluvieuse durant laquelle s'activent d'importants processus de lixiviation qui abaissent les valeurs de conductivité électrique, alors que les valeurs relatives au sodium ne varient quasiment pas.

Dans les sols irrigués à l'eau saline, l'état d'agrégation des sols est sujet à des changements saisonniers, passant de formes optimales, granulaires ou polyhédriques angulaires et subangulaires à des formes massives hautement indésirables et, dans le cas des sols à forte teneur en sodium, la formation consécutive d'argiles sodiques et la destruction des agrégats donne naissance à des formes structurales colonnaires grossières et massives, typiques d'horizons particuliers du sol, dits « natriques ». Tant que les quantités de sodium apportées et enlevées sont équivalentes, un certain équilibre est maintenu ; celui-ci est détruit immédiatement quand, en raison de processus de lixiviation activés par les pluies automnales et hivernales, les enlèvements dépassent les apports. Dans ces conditions, une partie du sodium échangeable s'hydrolyse en formant de l'hydrate de sodium qui réagit immédiatement aux ions bicarboniques existants pour former du carbonate de sodium et le sol acquiert de forts caractères d'alcalinité.

Sous l'influence d'importantes quantités de sodium, la structure reste toujours à l'état massif, alors que dans les sols salino-sodique, elle reste à l'état dispersé pendant la période humide pour se compacter ensuite pendant la saison sèche, donnant lieu à un système fissuré polygonal. L'intensité de cette dispersion dépend de la texture du sol et de sa minéralogie. Des sols à fort pourcentage d'argiles montmorillonitiques sont très sensibles à l'action du sodium alors que les argiles kaolinitiques sont moins sensibles. Le processus de sodisation est plus grave que celui

de salinisation et dans les cas limites les effets sur les sols sont irréversibles. Les deux formes de salinité coexistent souvent (*Dazzi et Fierotti, 1994*).

Concernant les résultats du monitoring effectué dans la zone choisie, il faut noter la façon dont, dans le cas étudié, le recours à une stratégie agronomique de culture qui connaît (en fonction de la disponibilité d'eau de bonne qualité), l'alternance d'irrigations avec des eaux de puits (salines) et d'eaux de citerne (douces), permet aussi selon les cultures choisies (tolérant la salinité pour la tomate, peu tolérantes pour le cantaloup) d'obtenir des résultats de production pouvant être généralement définis comme satisfaisants (Fig. 7.32, 7.33 et 7.34) même si, pour le cantaloup, une nette manifestation de souffrance ayant déclenché des processus pathogènes liés à la pourriture des racines (Fig. 7.35, 7.36 et 7.37), a été observée.



Fig. 7.32 - Détail de la culture de la tomate arrosée à l'eau douce (14/12/2007).





Fig. 7.33 - Détail de la culture de la tomate arrosée à l'eau saline (14/12/2007).



Fig. 7.34 - Détail de la culture de la tomate en situation du contrôle (14/12/2007).



Fig. 7.35 - Détail de la culture du cantaloup arrosé à l'eau douce (28/06/2008).



Fig. 7.36 - Détail de la culture du cantaloup arrosé à l'eau saline (28/06/2008).



Fig. 7.37 - Détail de la culture du cantaloup en situation du contrôle (28/06/2008).

Il est clair que face à des problèmes aussi vastes et complexes, la mise en œuvre de ressources et de moyens adaptés est nécessaire, en considérant surtout que, pour les sols atteints de salinité secondaire, il faut connaître et évaluer l'influence des sels sur les plants et sur le sol et, inversement la façon dont les pratiques agricoles (cultures, travaux, fertilisations, irrigations, etc.) influencent la qualité du sol et des eaux.

Les problèmes posés par les sols salins pour leur amendement et réhabilitation à l'agriculture sont très complexes. Il n'existe pas de méthode unique toujours valable et applicable de façon universelle pour la gestion des sols salins et pour le contrôle de la salinité mais, d'une fois à l'autre, il est nécessaire de recourir à l'association de diverses pratiques qui doivent non seulement se compléter entre elles, mais aussi être choisies selon les cas.

La préférence de l'une ou l'autre méthode sera dictée par les caractéristiques du sol, par les objectifs à atteindre, par la situation économique de l'exploitation. Toutefois,

certaines directives, auxquelles il est impossible de déroger, devront toujours être considérées. Elles peuvent être résumées comme suit:

- Choix de cultures ou de variétés permettant des productions satisfaisantes dans les conditions de salinité du moment;
- Pratiques spéciales de culture minimisant la présence de sels à proximité des plants et créant les meilleures conditions de perméabilité;
- Irrigations telles à assurer un niveau relativement élevé d'humidité du sol ou permettre une certaine lixiviation des sels (leaching requirement);
- Construction de drains pour permettre une élimination rapide des eaux d'écoulement;
- Choix des amendements les mieux adaptés à un échange facile du sodium sur le complexe d'échange.

Il va de soi que ces objectifs peuvent être atteints uniquement par le biais d'une étroite collaboration entre le pédologue et l'agronome. Le premier, par une observation des plus précises des sols de la campagne et une enquête des plus détaillées en laboratoire, pourra fixer le degré d'évolution atteint par le sol et l'opportunité d'interventions visant à leur amélioration ; le deuxième, par le choix des cultures les plus appropriées et l'utilisation de machines adaptées, permettra que les sols salins affectés à l'agriculture assurent des niveaux de production et des rendements économiques compétitifs.



## ***Chapitre 8 - Identification des zones sensibles à la désertification en Sicile du point de vue de la qualité du climat et du sol***

***Pr G. Giordano, Pr V. Ferro***

***Département de Génie et Technologies Agro-Forestières - ITAF, Université des Études de Palerme***

### **8.1 Méthodologies, temps et phases de la recherche sur le bassin du Fleuve Imera méridional.**

Les opérations objets été destinées à l'étude des modalités de calcul et l'utilisation des informations sur l'indice d'agressivité des pluies et le facteur d'érodibilité des sols pour identifier, dans le cadre du modèle ESAs, les zones sensibles à la désertification, sur le plan de la qualité du climat et des sols, du bassin de l'Imera méridional.

Concernant le bassin hydrographique de l'Imera méridional, leur objectif été de:

- a) Monitorer à l'échelle parcellaire le phénomène érosif pour valider les indicateurs et les modèles mathématiques adoptés;
- b) Évaluer, à l'échelle moyenne annuelle, le facteur climatique de l'USLE et le déficit pluviométrique;
- c) Définir des procédures, des modalités et l'applicabilité du facteur climatique de l'USLE et du déficit pluviométrique pour le calcul de l'indice de qualité du climat du modèle ESAs;
- d) Cartographier le facteur climatique de l'USLE, l'indice de qualité et du sol (selon le schéma ESAs) et l'érosion potentielle;
- e) Définir des procédures, des modalités et l'applicabilité du facteur d'érodibilité du sol pour le calcul de l'indice de qualité du sol du modèle ESAs;
- f) Définir les zones sensibles à la désertification, du point de vue de la qualité du climat et du sol.

### **8.2 Résultats**

### 8.2.1 Détermination de la contribution érosive rill dans le calcul de la perte de sol globale.

Pour les évènements où existent des mesures simultanées d'écoulement et de perte de sol sur microparcelles et parcelles de type Wischmeier, il a été possible d'effectuer une comparaison des différentes phénoménologies érosives qui se produisent. Plus particulièrement, les trois premiers évènements (avril, novembre et décembre 2000) se rapportent uniquement aux parcelles de 22 m de longueur et aux microparcelles de  $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$  et  $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$ , les dix évènements suivants (avril 2002 - octobre 2002) se rapportent aussi à des microparcelles plus grandes ( $1 \times 1 \text{ m}^2$  et  $1 \times 5 \text{ m}^2$ ) et aux parcelles de 33 m, alors que pour les six derniers évènements, il existe les mesures simultanées de tous les types d'installations. Compte tenu que les microparcelles, vu les longueurs limitées, ne permettent de détecter que la composante érosive *interrill*, la comparaison des mesures de perte de sol relatives à toutes les parcelles expérimentales, au-delà de fournir des indications de l'incidence sur le total de l'érosion *rill*, peut permettre d'identifier la longueur de ruissellement critique, au dépassement de laquelle commence à se manifester l'influence érosive de type *rill* (en rigoles).

L'analyse a été effectuée en reportant sur un graphique à échelles logarithmiques (Fig. 8.1) les paires valeur moyenne de la perte de sol spécifique-surface de la parcelle  $S_p$ . Le choix de rapporter la perte de sol spécifique à la surface de la parcelle vient de la nécessité de devoir représenter des mesures relatives à des parcelles de longueur différente mais aussi, notamment dans le cas de microparcelles, de largeur différente. Dans la plupart des cas, les droites idéales obtenues en reliant les points représentatifs des microparcelles fournissent, pour les valeurs de l'abscisse correspondant aux parcelles de type Wischmeier, des valeurs de la perte de sol plus limitées que les valeurs mesurées dans ce dernier type de parcelle (Fig.8.1a). Concernant les microparcelles de  $1 \times 5 \text{ m}^2$  il a été observé aussi bien des cas où les points expérimentaux correspondants s'alignent avec des données relatives aux autres microparcelles (évènement du 9-12/12/04, Fig.8.1b) que des cas où les points se

disposent dans une zone du plan cartésien intermédiaire entre la droite *interrill* et les points des parcelles Wischmeier (événement du 12/01/03, Fig. 8.2a). Enfin, pour deux évènements seulement (27/11/02 et 13/10/04, Fig. 8.2b), les points représentatifs des parcelles s'alignent sur les points relatifs aux microparcelles, ce qui équivaut à dire que la phénoménologie érosive est uniquement de type *interrill*.

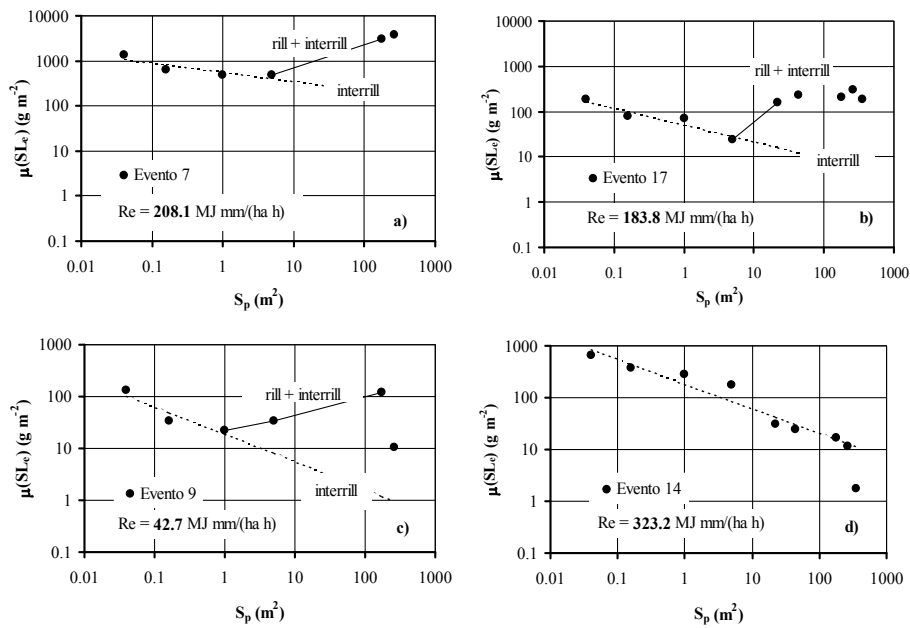


Fig. 8.1 - Comparaison, pour certains évènements, de la perte de sol mesurée à différentes échelles.



a



b



c

Fig. 8.2 - Vue des microparcelles sur le versant équipé de Sparacia.



Le Tableau 8.1 pour les parcelles de longueur 22 et 33 m, le Tableau 8.2 pour les parcelles de 11 m et le Tableau 8.3 pour les parcelles de 44 m indiquent en détail, pour tous les événements disponibles, au-delà des valeurs de la précipitation totale de l'évènement  $P_e$  (mm) et le facteur climatique correspondant  $R_e$  (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), les valeurs de perte de sol de type *interrill*  $SI$  et *rill*  $SR$  estimées respectivement par l'ordonnée de la droite *interrill*, pour une abscisse correspondant à la superficie de la parcelle, et par la distance du point expérimental, représentatif de la mesure d'érosion totale, par la droite *interrill* même. Pour les parcelles de 11, 33 et 44 m, la contribution érosive *rill* relative à l'évènement du 13/10/04, caractérisé par des pertes de sol spécifiques limitées malgré une forte valeur du facteur d'agressivité de la précipitation, a été définie à zéro.

Tipo di parcella			Parcella 8x22 m <sup>2</sup>			Parcella 8x33 m <sup>2</sup>		
Data	$P_e^{(1)}$ (mm)	$R_e$ (MJ mm h <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	Rill SR (g/m <sup>2</sup> )	Interrill SI (g/m <sup>2</sup> )	$R_T^{(2)}$	Rill SR (g/m <sup>2</sup> )	Interrill SI (g/m <sup>2</sup> )	$R_T^{(2)}$
11-12/04/00	25.6	57.0	1.60	0.12	92.76			
17-19/11/00	50.2	192.0	456.71	1.94	99.58			
25-29/12/00	69.7	346.9	754.35	0.41	99.95			
04/04/02	23.2	47.8	3.38	0.07	97.96	1.33	0.05	96.43
07/05/02	27.2	63.6	2.34	1.52	60.56	1.04	1.19	46.58
06/09/02	28.4	68.8	3197.43	2.40	99.92	2483.99	1.76	99.93
10-12/10/02	46.6	208.1	2872.20	195.83	93.62	3680.28	180.27	95.33
27/11/02	29.0	100.2	1.15	19.00	5.72	0.84	16.40	4.89
12/01/03	19.0	42.7	118.50	1.23	98.97	9.58	0.99	90.62
04/04/03	30.6	57.4	25.80	0.47	98.22	3.87	0.35	91.66
09-10/06/03	32.2	272.0	2426.76	41.18	98.33	474.79	34.58	93.21
18/06/03	21.0	180.4	3289.87	110.21	96.76	1371.04	99.47	93.24
14-15/10/03	36.6	253.0	432.50	142.05	75.28	301.03	127.98	70.17
13/10/04	27	323.2	0.76	15.82	4.58	0	11.29	0
02-04/11/04	49.4	122.2	1611.55	66.62	96.03	1112.76	56.81	95.14
16/11/04	53.8	341.6	283.21	37.91	88.19	461.32	33.74	93.18
09-12/12/04	36.0	183.8	198.93	7.45	96.39	293.78	6.40	97.87
16-20/12/04	77.0	127.1	374.95	49.38	88.36	295.91	44.15	87.02
11-12/04/05	48.4	103.9	74.58	5.13	93.56	50.94	4.36	92.12

(1) Altezza di pioggia complessiva dell'evento erosivo

(2) Rapporto, espresso in %, tra l'erosione rill e quella totale (rill+interrill)

Tab. 8.1 - Perte de sol imputable à l'érosion de type rill et interrill pour les parcelles de 22 et 33 m.

Evento	Tipo di parcella			Parcella 2x11 m <sup>2</sup>			Parcella 4x11 m <sup>2</sup>		
	Data	P <sub>e</sub> <sup>(1)</sup> (mm)	R <sub>e</sub> (MJ mm h <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	Rill SR (g/m <sup>2</sup> )	Interrill SI (g/m <sup>2</sup> )	R <sub>T</sub> <sup>(2)</sup>	Rill SR (g/m <sup>2</sup> )	Interrill SI (g/m <sup>2</sup> )	R <sub>T</sub> <sup>(2)</sup>
14	13/10/04	27	323.2	0.00	42.72	0.00	0.00	30.67	0.00
15	02- 04/11/04	49.4	122.2	3654.61	150.76	96.04	1028.80	114.83	89.96
16	16/11/04	53.8	341.6	930.41	68.88	93.11	452.28	56.45	88.90
17	09- 12/12/04	36.0	183.8	146.59	16.19	90.05	216.22	12.50	94.53
18	16- 20/12/04	77.0	127.1	1100.60	87.68	92.62	520.96	72.41	87.80
19	11- 12/04/05	48.4	103.9	50.32	11.83	80.96	0.00	8.95	0.00

(1) Altezza di pioggia complessiva dell'evento erosivo

(2) Rapporto, espresso in %, tra l'erosione rill e quella totale (rill+interrill)

Tab. 8.2 - Perte de sol imputable à l'érosion de type *rill* et *interrill* pour les parcelles de 11 et m.

Evento	Tipo di parcella			Parcella 8x44 m <sup>2</sup>		
	Data	P <sub>e</sub> <sup>(1)</sup> (mm)	R <sub>e</sub> (MJ mm h <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	Rill SR (g/m <sup>2</sup> )	Interrill SI (g/m <sup>2</sup> )	R <sub>T</sub> <sup>(2)</sup>
14	13/10/04	27	323.2	0.00	11.36	0.00
15	02- 04/11/04	49.4	122.2	512.28	50.74	90.99
16	16/11/04	53.8	341.6	694.51	31.07	95.72
17	09- 12/12/04	36.0	183.8	184.33	5.75	96.97
18	16- 20/12/04	77.0	127.1	267.21	40.78	86.76
19	11- 12/04/05	48.4	103.9	0.00	3.88	0.00

(1) Altezza di pioggia complessiva dell'evento erosivo

(2) Rapporto, espresso in %, tra l'erosione rill e quella totale (rill+interrill)

Tab. 8.3 - Perte de sol imputable à l'érosion de type *rill* et *interrill* pour les parcelles de 44 m.

En effet, pour cet évènement, on observe à partir de l'analyse de la Figure 8.1.d, pour toutes les installations expérimentales, seulement une phénoménologie érosive de type *interrill* dès que les points correspondant aux parcelles de 2 x 11 m<sup>2</sup>, 4 x 11 m<sup>2</sup>, 8 x 22 m<sup>2</sup>, 8 x 33 m<sup>2</sup> se disposent le long du même alignement relatif aux quatre microparcelles, voire en dessous pour les parcelles 8 x 44 m<sup>2</sup>. Pour la même raison, au

niveau de l'évènement du 11-12/04/2005, la contribution érosive *rill*, relative cette fois uniquement aux parcelles  $P_{4 \times 11}$  et  $P_{44}$ , a été définie à zéro.

Dans la plupart des cas, le pourcentage d'érosion *rill* est toutefois apparu prépondérant par rapport à l'érosion *interrill*. En particulier, à l'exception de trois évènements, le pourcentage *rill* a pris des valeurs de 75 à 99% pour les parcelles de 22 mm et de 70 à 99% pour les parcelles de 33 m. Relativement aux parcelles  $2 \times 11 \text{ m}^2$ , à l'exception de l'évènement du 13/10/2004, le pourcentage d'érosion *rill* a pris des valeurs de 81 à 96% alors que, enfin, pour les  $P_{4 \times 11}$  et  $P_{44}$ , à l'exception de l'évènement des 13/10/2004 et 12/04/2005, le pourcentage *rill* a pris des valeurs de respectivement de 88 à 95% et de 87 à 97%. Les pourcentages de l'érosion *rill* s'avèrent donc toujours plutôt élevés et indépendants de l'indice d'agressivité de la pluie caractérisé par des valeurs de  $42.7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (12/01/03) à  $346.9 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (25-29/12/00).

Les résultats indiqués dans les graphiques de la Figure 8.1 ne subissent pas de variations significatives si la perte de sol spécifique est «diagrammée» en fonction de la longueur de la parcelle.

Pour les écoulements associés à chaque évènement érosif, on continue à observer un comportement différent entre les valeurs de la grandeur mesurées sur les microparcelles par rapport aux mêmes valeurs mesurées sur les parcelles de type Wischmeier. À titre d'exemple, la Figure 8.3 indique les écoulements liquides  $V$  rapportés à la zone de la parcelle  $S_p$  pour deux évènements érosifs. Dans ce cas aussi, il est possible généralement d'identifier une droite idéale représentative des microparcelles plus petites, qui passe par les valeurs correspondantes d'abscisse, en dessous des points représentatifs des parcelles de type Wischmeier (Fig.8.3a). Les seuls évènements où l'on observe par contre un alignement unique des points relatifs aux parcelles et aux microparcelles sont, là aussi, les évènements des 27/11/2002 et 13/10/2004 (Fig. 8.3b). Les points expérimentaux relatifs aux microparcelles de longueur 5 m s'alignent en revanche, à la différence des mesures d'érosion, toujours le long de la même droite idéale *interrill* formée par le biais des mesures relatives aux trois autres types de microparcelles. L'écoulement par unité de surface mesuré sur les plus grandes microparcelles est toujours plus bas que l'écoulement des autres

microparcelles mais, s'agissant d'écoulement partiellement canalisé, il s'avère évidemment plus efficace dans le transport des sédiments, déterminant dans certains cas et comme observé ci-dessus, un écart vers le haut des mesures d'érosion correspondantes par rapport à la droite idéale *interrill* (Fig. 8.1c).

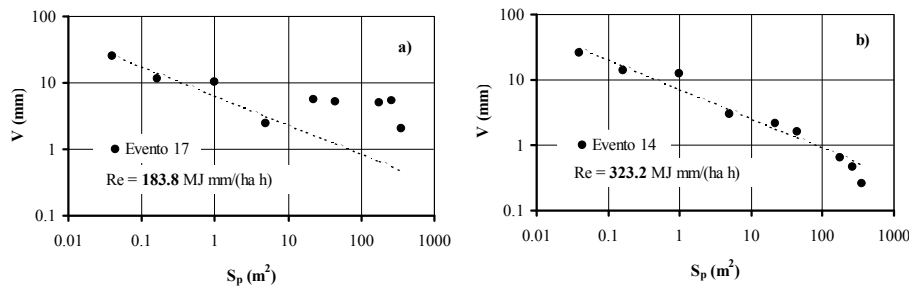


Fig. 8.3 - Comparaison de l'écoulement mesuré sur parcelles de dimensions différentes.

Les évolutions globalement identiques obtenues pour l'écoulement et la perte de sol ont amené à corrélérer, pour chaque évènement érosif et pour tous les types de parcelles et de microparcelle, la perte de sol  $SL_e$  (g/m²) à l'écoulement granuleux global  $V_t$  (mm). En reportant les grandeurs, avec les unités de mesure indiquées, dans un plan cartésien, la pente de la droite de régression passant par l'origine du système de référence donne la valeur moyenne de la concentration érodée en g/l.

L'observation des données expérimentales a mis en évidence aussi bien des cas où l'on obtient des valeurs élevées du coefficient de détermination (évènement du 04/04/02, Fig. 8.4a), et il est donc possible de définir une valeur moyenne unique de concentration de la suspension érodée sur tous les types de parcelles et de microparcelles expérimentales, que des cas où il est impossible de définir une relation de ce type (évènement du 16/11/04, Fig. 8.4b). Dans le premier cas, le processus d'érosion est limité à la capacité de transport du courant, donc quand la taille de la parcelle augmente, la concentration de la charge solide que le courant parvient à emporter de varie pas. Autrement dit, l'effet d'échelle dépend du fait que quand la taille de la parcelle augmente, l'écoulement produit par unité de surface se réduit. Dans le deuxième cas par contre, le phénomène érosif est principalement contrôlé par

la capacité érosive de la précipitation et du courant canalisé dans les *rill* (rigoles). En Figure 8.4b, les points représentatifs des mesures à l'échelle parcellaire mettent en évidence que même dans le cas de valeurs limitées du volume d'écoulement, le transfert de ce dernier sous forme canalisée incrémente le transport solide. En considérant les mesures relatives aux microparcelles, à trois seules exceptions (sur un total de 16 évènements) déterminées toutefois par les points expérimentaux relatifs aux plus grandes microparcelles ( $1 \times 5 \text{ m}^2$ ), les valeurs des coefficients de détermination des droites interpolantes s'avèrent toujours élevées et entre 0.79 et 0.99. De la même façon, en considérant les évènements où le fonctionnement des quatre types de parcelles Wischmeier a été obtenu, le même type d'analyse permet de trouver, à l'exception de trois cas sur un total de onze, une valeur de concentration commune à tous les types de parcelles (valeurs des coefficients de détermination comprises entre 0.56 et 0.97). Autrement dit, il est possible de trouver une unique valeur de concentration si le phénomène érosif qui se met en œuvre est seulement de type *interrill* voire, même moins nettement, dans le cas d'évènements à érosion *rill* et *interrill*. De plus, pour les évènements où l'on a en même temps les mesures de parcelles et microparcelles comme dans le cas de la Figure 8.4b, la valeur de concentration moyenne, fournie par le coefficient angulaire de la droite interpolante, relative aux parcelles Wischmeier s'avère, comme on peut l'imaginer, toujours supérieure à la valeur correspondante, relative aux microparcelles. Enfin, pour les évènements des 27/11/02, 13/10/04 et 11-12/04/05, où il n'est pas possible de trouver une contribution érosive *rill* prépondérante par rapport au total d'érosion, même les points expérimentaux ( $V_t$ ,  $SL_e$ ) relatifs aux parcelles s'alignent sur la même droite qui passe par les points relatifs aux microparcelles.

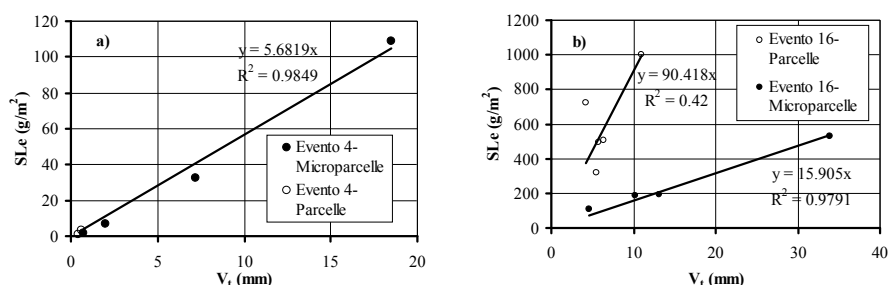


Fig. 8.4 - Relation entre perte de sol et volume de la suspension granuleuse dans les différents types de parcelles et microparcelles.

Même avec les incertitudes liées aux nombreux paramètres intervenant dans la définition, la réponse érosive de chaque parcelle permet de tirer certaines conclusions. L'érosion *interrill* est une forme érosive typique des microparcelles de dimensions jusqu'à  $1 \times 1 \text{ m}^2$  du moment que les points représentatifs des pertes de sol correspondantes se disposent sur la même droite des plus petites microparcelles. Concernant en revanche les microparcelles de  $1 \times 5 \text{ m}^2$ , on a observé aussi bien des cas où la phénoménologie érosive est seulement de type *interrill* que des cas où, par contre, les points correspondant aux pertes de sol se disposent dans une zone du plan cartésien intermédiaire, entre la droite *interrill* et la droite *rill + interrill*. En effet, à l'occasion d'échantillonnages effectués immédiatement après que ce soit produit un évènement érosif, on a observé visuellement, même sur des parcelles de longueur de 5 m, la formation de canaux d'écoulement assimilables à de véritables *rill* (rigoles).

Du moment que, généralement, le rapport entre la perte de sol moyenne mesurée pour les parcelles de type Wischmeier et la perte estimée, au niveau des valeurs de surface correspondant aux parcelles, à partir du prolongement de la droite formée par les mesures effectuées sur les microparcelles, est élevé, la contribution de la seule érosion *interrill* peut être considérée comme une part négligeable de l'érosion totale (*rill + interrill*).

Enfin, l'analyse conjointe des écoulements et de la perte de sol mesurée a permis d'établir qu'il est possible de trouver des valeurs de concentration moyenne différentes dans le cas où la phénoménologie érosive qui se déclenche n'est que de type *interrill* ou s'avère de type *rill* plus *interrill*.

### 8.2.2 Analyse de l'influence du facteur topographique sur la perte de sol

Conformément au schéma proposé par l'USLE, l'érosion hydrique, produite par un évènement de précipitation en aval de parcelles expérimentales, dépend comme les autres facteurs du modèle, du facteur longueur du versant. Sur vingt-cinq évènements érosifs enregistrés sur la zone expérimentale de Sparacia, où l'on a en même temps des mesures de perte de sol de parcelles de dimensions différentes, l'influence du facteur  $L$  sur la perte de sol a été testée.

Le coefficient d'érodibilité du sol  $K_e$ , selon la définition de Wischmeier et al. (1971), dépend fondamentalement des caractéristiques intrinsèques du type de sol, mais sa détermination peut aussi être effectuée de façon indirecte à partir des valeurs de perte de sol mesurées en aval de parcelles expérimentales selon le schéma mathématique prévu par l'USLE. En voulant adopter ce type d'approche et le coefficient d'érodibilité étant une propriété intrinsèque du sol, le schéma le plus simple pour sa mesure est celui qui utilise des reliefs de perte de sol de parcelles expérimentales qui se trouvent en condition de référence (longueur libre du versant de 22.1 m, pente de 9%, parcelle dépourvue de végétation et continuellement labourée dans le sens de la pente). Dans cette condition en effet, les coefficients  $L$ ,  $S$ ,  $C$ ,  $P$  qui figurent dans l'USLE s'avèrent égaux à l'unité et le calcul de  $K_e$ , par évènement fixé, sont simplement fournis par le rapport entre la perte de sol mesurée et l'indice d'agressivité de la précipitation.

Dans l'aire expérimentale de Sparacia notamment, on dispose de certaines parcelles qui se trouvent dans une condition très proche de celle de référence (parcelles A-E en Fig. 8.5) caractérisées par  $L=1$ ,  $C=P=1$  et situées sur un versant à pente de 14.9%.

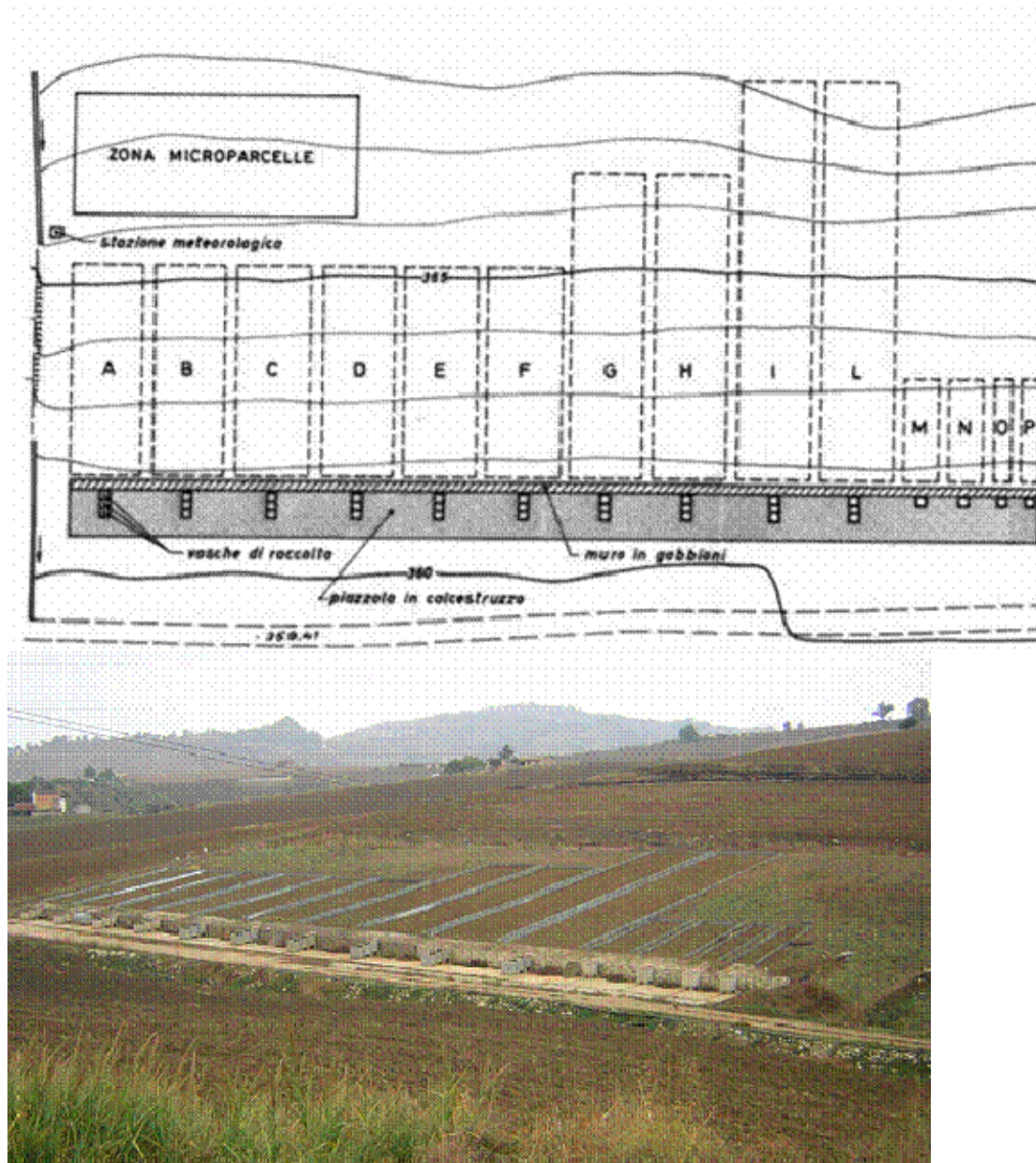


Fig.8.5 - Plan et vue de l'installation expérimentale avant l'exécution des travaux.

En considérant donc les données de perte de sol mesurées sur ce type de parcelle, le coefficient d'érodibilité du sol  $K_{22}$  a été calculé en divisant la perte de sol mesurée ( $A_{22}$ ) dans chaque événement par le produit entre le facteur pente du versant  $S_{22}$  et le facteur climatique  $R_e$ :



$$K_{22} = \frac{A_{22}}{R_e S_{22}} \quad [8.a]$$

où, pour  $S_{22}$  il a été utilisé la formule:

$$S = (16.8 \sin \beta - 0.5) \quad [8.b]$$

En utilisant la (8.a) et en considérant toutes les données historiques disponibles, il a été obtenu, par évènement fixé, des valeurs moyennes parcellaires (moyenne des 5 valeurs relatives aux parcelles A-E) de  $K_{22}$  comprises entre 0.00013 et 0.21658 t ha<sup>-1</sup> par unité de  $R_e$  (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). La valeur moyenne relative à l'ensemble des évènements et des cinq répliques disponibles est de 0.02911 t ha<sup>-1</sup> par unité de  $R_e$ .

La série historique des valeurs de  $K_e$  calculées par le biais de la (8.a) a été appliquée, pour les évènements caractérisés par des mesures en simultanée, aux parcelles de 11, 33 et 44 m afin d'effectuer une estimation de la perte de sol sur ces parcelles à comparer aux valeurs mesurées. La comparaison de la perte de sol estimée par le modèle, en utilisant les valeurs de  $K_{22}$ , à la perte de sol mesurée sur les parcelles  $P_{2 \times 11}$ ,  $P_{4 \times 11}$ ,  $P_{33}$ ,  $P_{44}$  a permis de calculer le facteur topographique correspondant  $L_{11}$ ,  $L_{33}$ ,  $L_{44}$  et de contrôler certains coefficients dont dépend ce facteur. Conformément au schéma proposé par l'USLE, la perte de sol estimée des parcelles longues  $\lambda$  (m) s'exprime comme suit :

$$A_{\lambda,c} = R_e S_{33} K_{22} L_{\lambda} \quad [8.c]$$

où  $A_{\lambda,c}$  est la perte de sol estimée des parcelles de l (11, 33 et 44 m),  $L_{\lambda}$  est le facteur topographique calculé pour une longueur de ruissellement égale à  $\lambda$  (m) et  $S_{33}$  est le facteur pente correspondant qui est de  $S_{22}$  car l'inclinaison du versant où sont positionnées toutes les installations est unique. Des expressions identiques à la 8.b peuvent évidemment être obtenues pour les autres types de parcelles de longueur libre de 11 et 44 m.

Le premier contrôle effectué a été celui d'évaluer l'influence du rapport entre érosion de type *rill* et érosion de type *interrill* dans le calcul du facteur topographique longueur du versant en utilisant pour ce dernier l'expression proposée par la RUSLE (8.d, 8.e, 8.f) et en considérant dans cette phase uniquement les évènements où l'on a en simultanée des mesures d'érosion de parcelles et de microparcelles.

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad [8.d]$$

$$m = \frac{af}{1 + af} \quad [8.e]$$

$$f = \frac{\sin \beta}{0.0896(3 \sin^{0.8} \beta + 0.56)} \quad [8.f]$$

En considérant à titre d'exemple uniquement les parcelles de longueur 33 m, on a alors procédé au calcul du facteur topographique exprimé par la (8.d) en utilisant l'expression de  $f$  de la (8.f) et en considérant des valeurs différentes du coefficient  $a$ . Pour ce dernier, on a notamment pris les valeurs 0.5, 1 et 2 et il a été aussi supposé une variation linéaire de  $a$  dépendant des valeurs prises par le rapport  $R_T$  entre l'érosion *rill* et l'érosion totale. Dans ce dernier scénario en particulier, on a fait varier  $a$  linéairement entre les valeurs extrêmes de 0.5 et 2 de sorte à faire correspondre à l'extrême inférieur la valeur la plus basse calculée du rapport  $R_T$  (46% pour l'évènement du 07/05/02) et à l'extrême supérieur 2 la valeur la plus haute (100%). L'équation qui exprime cette variation linéaire a l'expression suivante :

$$a = 0.028 R_T - 0.778 \quad [8.g]$$

Pour les différentes valeurs du coefficient  $a$  supposées, on a ensuite procédé au calcul de la perte de sol pour les parcelles de 33 m ( $A_{33,c}$ ) en appliquant l'expression (8.h), au niveau des évènements érosifs disponibles.

$$R = \frac{T}{2} c \quad [8.h]$$

La figure 8.6, qui représente les effets sur la valeur  $A_{33,c}$  des quatre contextes de variation du coefficient  $a$ , montre que la prise dans le calcul du facteur topographique d'une valeur de  $a$  égale à 1, généralement considérée dans les applications, ne détermine pas de différences sensibles dans l'estimation de la perte de sol. En effet, par rapport à la condition  $a=1$ , les autres contextes de variation supposés déterminent des différences inférieures à 7%. Des résultats similaires s'obtiennent dans les autres types de parcelles de longueur 11 et 44 m avec des différences qui, dans le pire des cas, ne dépassent pas 13% environ.

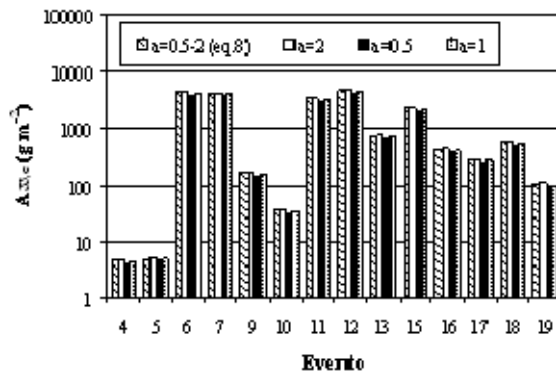


Fig. 8.6 - Évolution de la perte de sol estimée des parcelles de 33 m à la variation de la valeur du coefficient  $a$  figurant dans l'expression du facteur topographique de la RUSLE.

Une fois constatée l'influence toutefois négligeable du coefficient  $a$ , pouvant être de l'ordre de l'unité, la Figure 8.7a montre la courbe de fréquence empirique des valeurs effectivement mesurées du rapport  $f=\text{rill}/\text{interrill}$ , pour tous les types de parcelles expérimentales, comparées à la valeur théorique fournie par la 8.f. On observe en général une variation importante de  $f$  qui s'avère presque toujours supérieure à la valeur théorique, respectivement de 1.37 et 1.67 pour des pentes de 15 et 22%, prenant des valeurs comprises, dans la majorité des cas, entre 10 et 100. Même la valeur de  $m$ , calculée selon la 8.e avec  $a=1$ , prend des valeurs supérieures à

la valeur théorique ( $m=0.58$  ou  $0.63$  en fonction de la pente), en se maintenant, dans la plupart des cas, au-dessus de  $0.8$  (Fig. 8.7b).

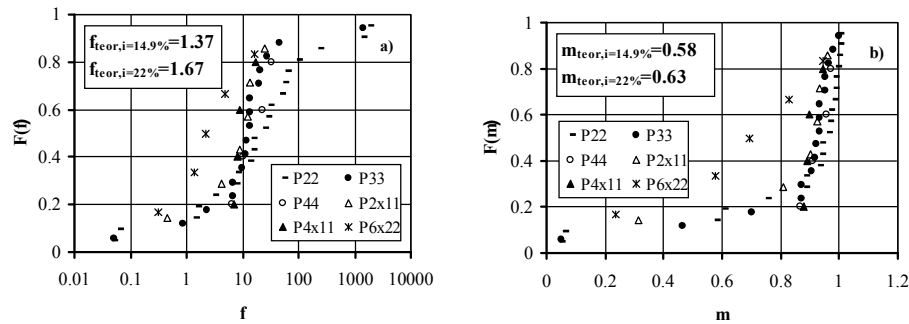


Fig.8.7 - Valeurs mesurées des coefficients  $f$  (8.f) et  $m$  (8.e) pour les événements érosifs disponibles dans les différents types de parcelles.

Toujours dans l'hypothèse  $\alpha=1$  la Figure 8.8 met en comparaison, pour les différents types de parcelles, les valeurs de perte de sol mesurée  $A_{\lambda,m}$  aux valeurs estimées  $A_{\lambda,c}$  à l'aide de la (8.c) faisant référence aux parcelles  $P_{2x11}$ ,  $P_{4x11}$ ,  $P_{33}$ ,  $P_{44}$ .

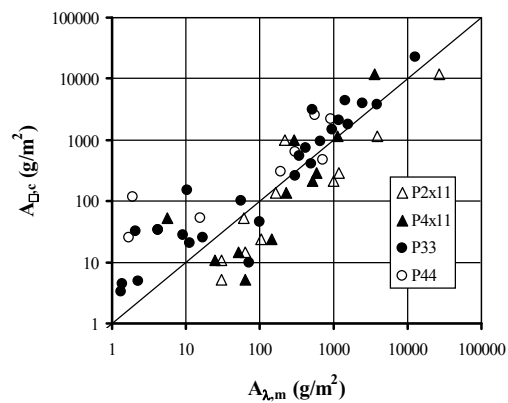


Fig. 8.8 - Comparaison de la perte de sol mesurée  $A_{\lambda,m}$  à la perte estimée  $A_{\lambda,c}$  pour les différents types de parcelles

L'examen du graphique met en évidence des valeurs de perte de sol mesurées des parcelles de 33 et 44 m inférieures par rapport à celles mesurées avec l'USLE en

utilisant les valeurs du coefficient d'érodibilité  $K_{22}$ . Dans le cas de parcelles de 11 m, le même type d'analyse détermine par contre, en général, des valeurs mesurées supérieures aux valeurs calculées. Ce résultat est imputable au fait que, pour chaque évènement érosif enregistré, les parcelles  $P_{33}$  e  $P_{44}$  ont fourni des valeurs de perte de sol par unité de surface comparables et généralement inférieures aux valeurs correspondantes obtenues par les parcelles plus courtes  $P_{22}$  alors que le résultat opposé s'est vérifié pour les parcelles de 11 m. Autrement dit, on peut considérer que quand la taille de la parcelle augmente, des phénomènes significatifs de dépôt se déclenchent, même à cette échelle de mesure. L'analyse du graphique (Fig. 8.8) montre par ailleurs que pour des évènements d'une certaine importance ( $>100 \text{ g m}^{-2}$  environ), pour lesquels d'éventuelles erreurs de mesure s'avèrent moins significatives, le champ de variation des points expérimentaux se resserre autour de la droite d'accord parfait. En définitive, pour les évènements les plus importants, le modèle semble mieux s'adapter aux points expérimentaux.

L'application des facteurs d'érodibilité  $K_{22}$  pour l'estimation de la perte de sol sur les parcelles  $P_{6 \times 22}$ , situées sur un versant à pente supérieure (22%), détermine par contre une meilleure concentration des points expérimentaux autour de la droite d'accord parfait surtout, comme précédemment observé, au niveau des évènements érosifs les plus importants (Fig. 8.9).

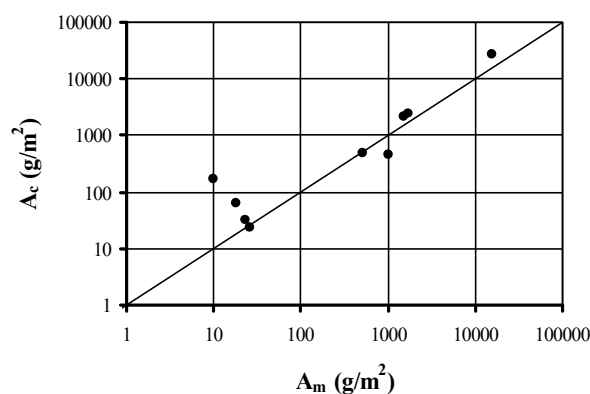


Fig. 8.9 - Comparaison de la perte de sol mesurée  $A_m$  à la perte estimée  $A_c$  pour les parcelles  $P_{6 \times 22}$ .

En considérant uniquement les types de parcelles de 33 et 44 m, pour lesquelles se produisent en général des pertes de sol inférieures aux parcelles de 22 m, le rapport entre la perte de sol mesurée  $A_{\lambda,m}$  et l'érosion calculée  $A_{\lambda,c}$  par le modèle peut être interprété comme coefficient de rendement solide SDR (*Ferro e Minacapilli, 1995*). En appliquant au cas des parcelles planes l'équation valide pour le cas de chaque unité morphologique division d'un bassin (*Ferro et Minacapilli, 1995*), on obtient:

$$\frac{A_{\lambda,m}}{A_{\lambda,c}} = SDR = \exp(-\beta_e t_p) = \exp(-\beta_e \frac{\lambda}{\sqrt{s}}) \quad [8.i]$$

où  $\beta_e$  est un coefficient,  $t_p$  est le temps de transfert de la particule de sol érodée par unité morphologique jusqu'au premier élément qui intercepte l'écoulement et  $\lambda$  et  $s$  sont, respectivement, la longueur et la pente de l'unité morphologique générique qui dans ce cas correspond à la parcelle de type Wischmeier. En appliquant le logarithme aux deux entités de la 8.i, on pourra calculer les valeurs du coefficient  $\beta_e$ :

$$\beta_e = -\frac{\sqrt{s}}{\lambda} \ln\left(\frac{A_{\lambda,m}}{A_{\lambda,c}}\right) \quad [8.j]$$

La Figure 8.10 montre, pour tous les évènements disponibles, les valeurs de SDR relatives aux parcelles de 33 et 44 m.

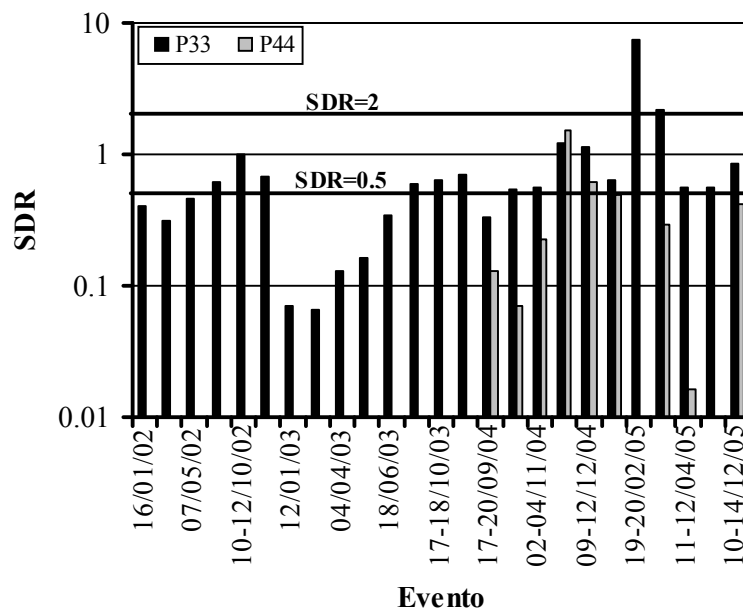


Fig. 8.10 - Évolution du coefficient de rendement solide SDR pour les parcelles de 33 et 44 m.

Les valeurs de SDR calculées sont généralement indépendantes de l'indice d'agressivité à savoir de l'entité de l'évènement érosif et présente, sauf pour quatre évènements sur un total de vingt-cinq, où l'on n'observe pas de phénomène de dépôt ( $SDR > 1$ ), une variabilité comprise entre environ 0.06 et 1. Les valeurs de SDR relatives aux parcelles de 44 mm sont toujours inférieures aux valeurs correspondantes des parcelles de 33 m et mettent en évidence une plus grande influence des phénomènes de dépôt.

Même le coefficient  $\beta_e$ , pouvant être obtenu en utilisant la 8.j, bien que montrant une certaine variabilité pour les deux types de parcelles, prend une valeur moyenne de 0.011 (médiane 0.007) et 0.015 (médiane 0.012) respectivement pour les parcelles de 33 et 44 m (Fig. 8.11).

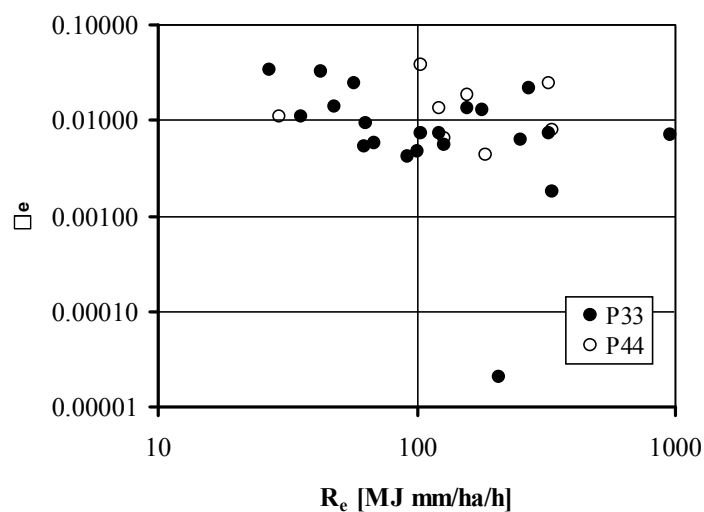


Fig.8.11 - Évolution du coefficient  $\beta$  à la variation de l'indice d'agressivité de la précipitation.

### 8.3 Détermination du facteur d'érodibilité, du facteur climatique et de l'érosion potentielle pour le bassin du fleuve Imera méridional.

Le facteur d'érodibilité du sol de l'USLE peut être considéré comme un indicateur valide aux fins de l'enquête compte tenu qu'il synthétise les informations concernant la texture du sol, sa teneur en matière organique, la structure et la perméabilité.

Pour l'évaluation du facteur d'érodibilité du sol  $K$ , il est nécessaire de disposer des données en entrée suivantes: teneur en limon et sable très fin,  $f$  (%) - particules de diamètre de 0.002 à 0.1 mm ; teneur en sable,  $g$  (%) - diamètre de 0.1 à 2 mm ; teneur en matière organique,  $h$  (%). Il faut aussi formuler des estimations qualitatives sur les caractéristiques de structure et de perméabilité du sol.

Les deux taux  $f$  et  $g$  s'obtiennent par la courbe granulométrique de l'échantillon de sol alors que la valeur de  $h$  est déterminée par le biais de techniques spécifiques de laboratoire.

La détermination de  $K$  se fait par le biais de deux phases successives. Tout d'abord, on obtient une valeur de première approximation,  $K'$ , en fonction des



informations quantitatives ( $f$ ,  $g$ ,  $h$ ); la valeur  $K'$  est ensuite corrigée sur la base des estimations qualitatives sur la structure et la perméabilité du sol.

La procédure d'évaluation de  $K$  repose sur l'utilisation de l'abaque de Wischmeier et al. (1971), constitué de deux graphiques corrélés (Fig. 8.12).

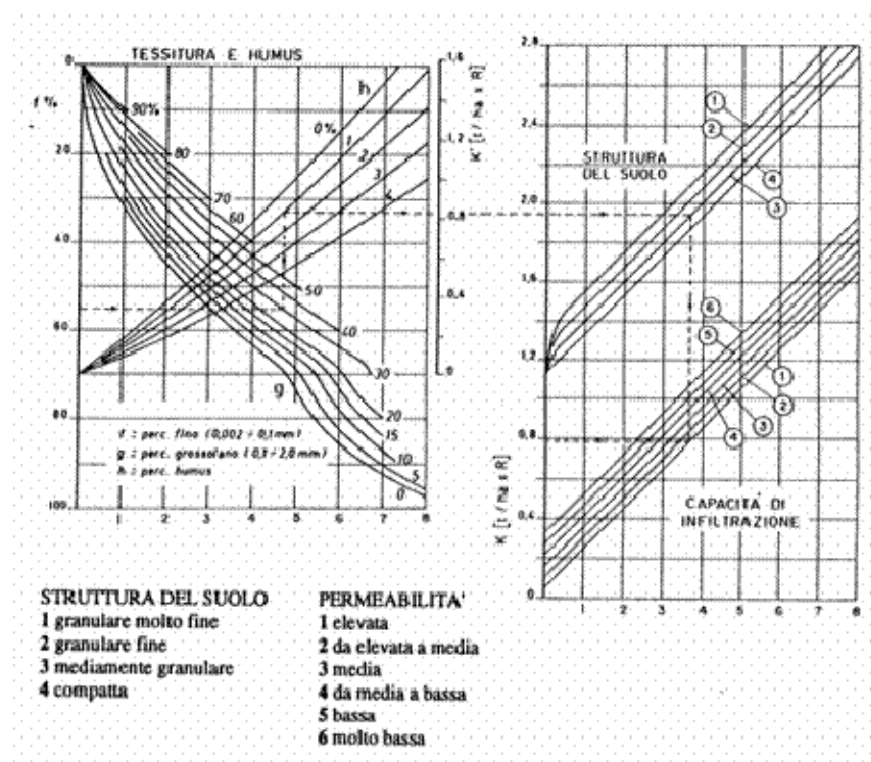


Fig. 8.12 - Abaque de Wischmier, Johnson et Cross pour l'évaluation du facteur d'érodibilité.

Sur le graphique de gauche, on trace, au niveau de la valeur de  $f$  exprimant le taux de matériau fin du sol en étude, un segment, normal vers l'axe des ordonnées, jusqu'à rencontrer la courbe qui représente le taux de matériau grossier de l'échantillon.

Naturellement, pour des valeurs de  $g$  différentes des valeurs indiquées clairement dans l'abaque, le point de rencontre est déterminé par interpolation. On trace ensuite un deuxième segment, perpendiculaire au premier, jusqu'à rencontrer la courbe représentant le taux de matière organique  $h$ . Un autre segment est ensuite tracé, vers le précédent, qui définit la valeur de première approximation  $K'$  du facteur d'érodibilité.

On prolonge ce segment jusqu'à rencontrer la droite correspondant à la classe de structure attribuée au sol (granulaire très fine, granulaire fine, granulaire moyenne ou grossière, en blocs, plate ou massive) puis on trace un autre segment, vers le précédent, qui finit au point de rencontre avec la droite qui représente la classe de perméabilité (élevée, élevée à moyenne, moyenne, moyenne à basse, basse, très basse). En traçant un dernier segment, perpendiculaire au précédent, on obtient enfin la valeur de  $K$ .

L'enquête a prévu l'application d'une procédure analytique proposée par Ferro (2006). En particulier, le A a proposé d'introduire dans l'abscisse de la première partie de l'abaque de la Figure 8.12, qui permet de déterminer  $K'$ , une grandeur  $x'$  à laquelle on donne par convention des valeurs de 0 à 8.

Pour des valeurs de  $x' < 5$ , pour lesquelles la procédure proposée est applicable, la relation entre cette variable  $x'$  et le taux de matériau fin peut être représenté par le biais de l'équation monôme suivante:

$$x' = \frac{f^{b_1}}{10^{b_0}} \quad [8.k]$$

où  $b_0$  et  $b_1$  sont des constantes numériques dont la valeur dépend du taux  $g$  de matériau grossier selon les rapports suivants:

$$b_0 = 3.993 - 1.362 \log g \quad [8.l]$$

$$b_1 = 2.63g^{-0.161} \quad [8.m]$$

Pour  $x' < 5$ , les valeurs de première approximation du facteur d'érodibilité sont fournies par le rapport suivant :

$$K' = \frac{10^{b_2}}{10^{b_0 b_3}} f^{b_1 b_3} \quad [8.n]$$

où les constantes numériques  $b_2$  et  $b_3$  peuvent être évaluées par les rapports suivants :

$$b_2 = -0.714 - 0.087 h \quad [8.o]$$

$$b_3 = 1.047 + 0.038 h \quad [8.p]$$

La correction pour considérer la structure du sol doit être faite de façon différente dans les deux champs  $K' \leq 0.4$  et  $K' > 0.4$ .

En indiquant par  $x$  la variable mise, encore conventionnellement, dans l'abscisse de la deuxième partie de l'abaque et qui prend des valeurs de 0 à 8 et avec  $SS$  l'indice de structure qui prend des valeurs entières de 1 à 4, pour  $K' \leq 0.4$  il résulte:

$$x = 10^{\frac{K' - 0.431}{0.304}} \quad (\text{pour } SS = 1) \quad [8.q.1]$$

$$x = \left( \frac{K'}{10^{-0.427}} \right)^{\frac{1}{0.559}} \quad (\text{pour } SS = 2) \quad [8.q.2]$$

$$x = \left( \frac{K'}{10^{-0.529}} \right)^{\frac{1}{0.684}} \quad (\text{pour } SS = 3) \quad [8.q.3]$$

$$x = \frac{K' - 0.004}{0.214} \quad (\text{pour } SS = 4) \quad [8.q.4]$$

Si par contre  $K' > 0.4$  le rapport entre  $x$  et  $K'$  est représenté par une zone de droites parallèles ayant les équations suivantes:

$$x = \frac{K' - 0.238}{0.204} \quad (\text{pour } SS = 1) \quad [8.r.1]$$

$$x = \frac{K' - 0.150}{0.204} \quad (\text{pour } SS = 2) \quad [8.r.2]$$

$$x = \frac{K' - 0.070}{0.204} \quad (\text{pour } SS = 3) \quad [8.r.3]$$

$$x = \frac{K' - 0.019}{0.204} \quad (\text{pour } SS = 4) \quad [8.r.4]$$

La correction déterminée sur la base de l'indice de perméabilité,  $PP$ , qui prend des valeurs entières de 1 à 6, s'effectue par le biais d'une zone de droites parallèles:

$$K = 0.198x + 0.053 \quad (K_s > 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}, PP=1) \quad [8.s.1]$$

$$K = 0.198x + 0.152 \quad (10^{-3} < K_s < 10^{-2}, PP=2) \quad [8.s.2]$$

$$K = 0.198x + 0.158 \quad (10^{-4} < K_s < 10^{-3}, PP=3) \quad [8.s.3]$$

$$K = 0.198x + 0.212 \quad (10^{-5} < K_s < 10^{-4}, PP=4) \quad [8.s.4]$$

$$K = 0.198x + 0.268 \quad (10^{-6} < K_s < 10^{-5}, PP=5) \quad [8.s.5]$$

$$K = 0.198x + 0.325 \quad (K_s < 10^{-6}, PP=6) \quad [8.s.6]$$

Pour chaque échantillon, l'indice de structure de Wischmeier et al. (1971) a été déterminé sur la base des informations de texture disponibles, à savoir en déterminant les taux d'argile  $A$ , limon  $L$  et sable  $S$ , et de la classification indiquée en Figure 8.13.

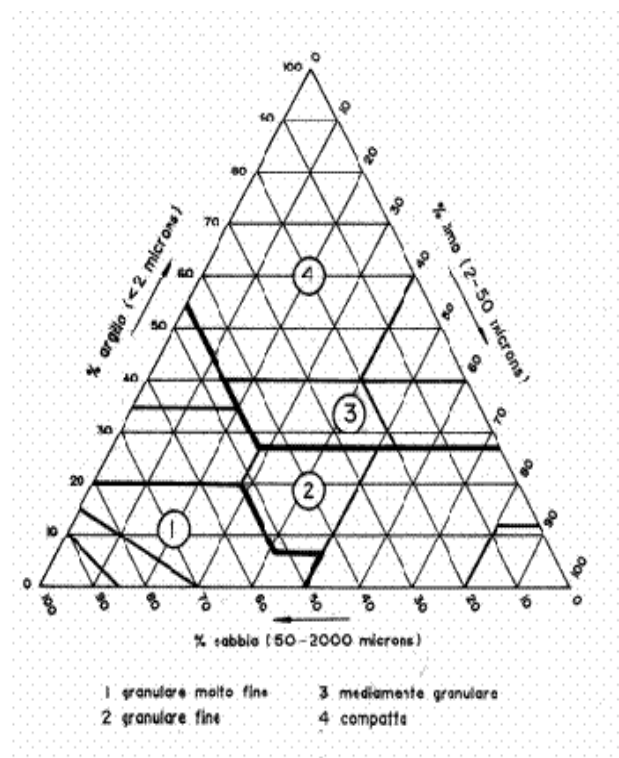


Fig. 8.13 - Association entre les valeurs des indices de structure  $SS$  et la classification USDA.

En particulier, l'indice de structure 1 (structure granulaire très fine) a été affecté à un sol, selon la classification USDA, sableux, sableux-franc et franco-sableux; l'indice 2 (structure granulaire fine) correspond au sol argilo-sableux, franco-sablo-argileux, franc, franco-limoneux et limoneux; l'indice 3 (structure moyennement granulaire) a été affectée au sol franco-limo-argileux et au sol franco-argileux ; l'indice de structure 4 (structure compacte) a été affecté au sol argileux et au sol argilo-limoneux.

Pour affecter l'indice de perméabilité, en l'absence de mesures de champ de la conductivité hydraulique à la saturation, on a tenu compte de l'association existante et indiquée dans le Tableau 8.4, entre le type de sol (classification USDA), la gamme de valeurs attendues de la conductivité hydrique saturée et l'échelle des valeurs de *PP* (de 1 à 6).

Tipo di suolo	Range di $K_s$ [cm s <sup>-1</sup> ]	Indice di Permeabilità
Franco Sabbioso Sabbioso Franco Sabbioso	$10^{-3} - 10^{-2}$	2
Franco Limoso Franco Franco Sabbioso Argilloso	$10^{-4} - 10^{-3}$	3
Argilloso Franco Limoso Argilloso Franco Argilloso Argilloso sabbioso Limoso	$10^{-5} - 10^{-4}$	4
Argilloso Limoso	$10^{-6} - 10^{-5}$	5

Tab. 8.4 - Valeurs de l'indice de perméabilité de Wischmeier et al. (1971) pour les sols siciliens.

Pour la détermination de la répartition spatiale du facteur d'érodibilité, il a été mis en œuvre un plan d'échantillonnage (Fig. 8.14) qui a prévu le prélèvement de 228 échantillons, uniformément répartis sur la superficie du bassin, dont les coordonnées ont été établies à l'aide d'un GPS.

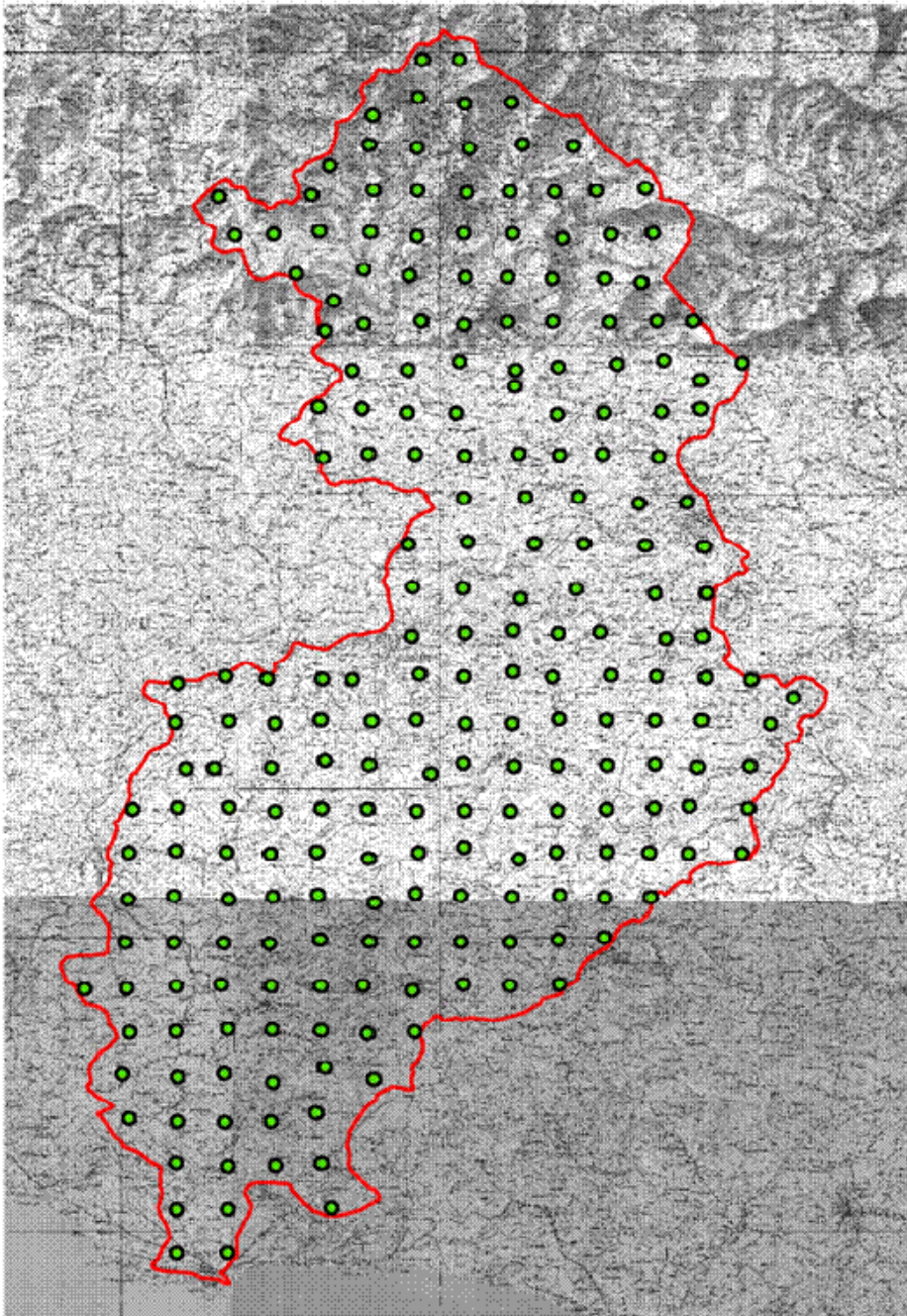


Fig. 8.14 - Plan d'échantillonnage du bassin hydrographique de l'Imera méridional.

Pour les 228 points d'échantillonnage, l'Annexe 8.1 indique le numéro d'identification de l'échantillon, la date du prélèvement, la coordonnée N (système de référence UTM), la coordonnée E et l'utilisation du sol relevé.

Pour chaque point d'échantillonnage, la procédure de Wischmeier et al. (1971) prévoit la détermination de la courbe granulométrique, la mesure du carbone organique total TOC et les estimations de l'indice de perméabilité *PP* et de l'indice de structure *SS* selon les procédures décrites.

Pour la détermination de la composition granulométrique du sol, on utilise un échantillon de sol remanié. Préalablement, l'échantillon, séché à l'air est écrasé au mortier, pour casser les agrégats les plus gros, puis tamisé avec un tamis avec un diamètre de maille de 2 mm. On prélève ensuite un échantillon de terre fine (particules de diamètre  $d < 2$  mm) d'un poids de 50 g, qui est traité à l'eau oxygénée à 15% pour éliminer les ciments organiques et avec une solution d'hexamétaphosphate de sodium pendant 24 heures, afin de favoriser la dispersion des particules argileuses. La solution est ensuite agitée et filtrée à travers un tamis à maille de diamètre 0.074 mm.

L'analyse granulométrique des particules de dimensions supérieures à 0.074 mm est effectuée par tamisage mécanique. La répartition dimensionnelle des particules les plus petites est déterminée en monitorant le processus de sédimentation de ces particules dans une solution aqueuse. En particulier, la fraction solide interceptée dans le tamis de 0.074 mm est envoyée dans une colonne de tamis à maille décroissante dans l'ordre suivant: 2, 1.68, 0.84, 0.59, 0.42, 0.25, 0.177, 0.149, 0.125, 0.088 et 0.074 mm. En fin de tamisage, on pèse le matériau retenu dans chaque tamis. Le rapport entre le poids des particules retenues dans un tamis particulier (ex. 0.59 mm) et le poids total de l'échantillon permet d'obtenir le taux en poids des particules de diamètre compris entre le diamètre du tamis considéré et celui du tamis immédiatement sus-jacent dans la colonne (0.59 - 0.84 mm, pour notre exemple). La suspension passant dans le tamis de 0.074 mm est collectée dans un cylindre gradué de 1000 cm<sup>3</sup> placé dans le bac pour l'analyse aérométrique, contenant de l'eau à une température constante de 20 °C. En synthèse, l'analyse aérométrique est effectuée



avec l'hydromètre de Bouyoucos, composé d'une ampoule calibrée et pourvu d'une échelle graduée. L'immersion de l'hydromètre dans la suspension à des moments préétablis, à 2, 5, 15, 30, 60, 180, 1440 et 2880 min, permet de monitorer sa densité. À l'aide de la loi de Stokes, on remonte à la quantité de particules de dimensions préétablies, présentes en suspension à chaque moment de mesure. L'ensemble des relevés (tamisage, sédimentation) est ensuite utilisé pour déterminer la répartition dimensionnelle des particules élémentaires de sol constituant la terre fine, représentée par la courbe granulométrique, qui indique le pourcentage en poids de particules de sol de dimensions inférieures ou égales à un diamètre préétabli. À partir de la courbe granulométrique, on remonte à la teneur en sable, limon et argile de l'échantillon. En particulier, selon la classification USDA (Fig. 8.15), le sable est composé de particules d'un diamètre de 2 à 0.05 mm, le limon de particules de 0.05 à 0.002 mm et l'argile de particules d'un diamètre  $< 0.002$  m (Hillel, 1998).

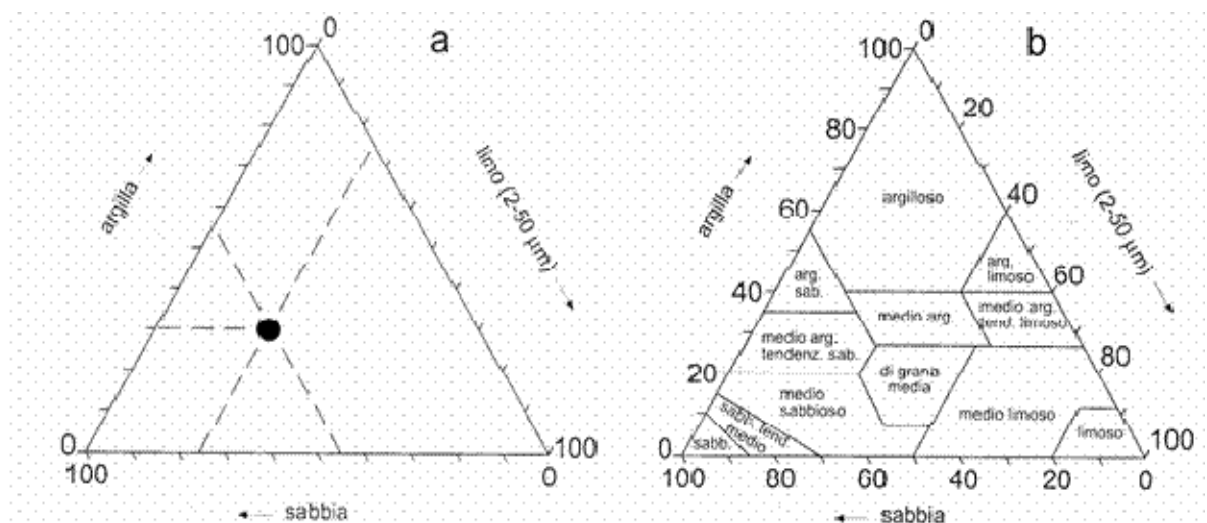


Fig. 8.15 - Triangle des classes de texture USDA.

La détermination du carbone organique total a été effectuée par combustion en four à moufle.

Après détermination des courbes granulométriques, des valeurs de TOC, des estimations de l'indice de structure *SS* et de l'indice de perméabilité *PP* relatives aux

228 échantillons, pour chacun d'eux a été effectuée l'estimation du facteur d'érodibilité du sol par la procédure analytique précédemment décrite.

L'étude de la variabilité spatiale du facteur d'érodibilité a été effectuée à l'aide du logiciel ISATIS.

Préalablement, il a été composé la carte du semivariogramme pour exclure ou mettre en évidence l'existence d'éventuelles directions d'anisotropie.

Aucune direction d'anisotropie n'ayant notamment été identifiée, un variogramme expérimental omnidirectionnel a été choisi.

Le semivariogramme expérimental, qui met en relation la valeur de la semivariance moyenne relative à chaque *lag* avec la valeur du *lag* correspondante, a été fabriqué avec un *lag* de 2310 m et un nombre de 10 lag.

L'opération suivante de *best-fitting* a permis d'adapter au semivariogramme expérimental un semivariogramme théorique, dit « imbriqué », composé d'un modèle exponentiel à effet *nugget*.

Enfin, à partir des paramètres déduits du modèle de semivariogramme adapté, la procédure d'interpolation spatiale a été effectuée, en utilisant le modèle *Geostatistical Analyst d'ArcGis 9.2*, avec adoption d'une *mesh size* de 20 m.

La Figure 8.16 montre la répartition spatiale du facteur d'érodibilité du sol pour le bassin hydrographique de l'Imera méridional.

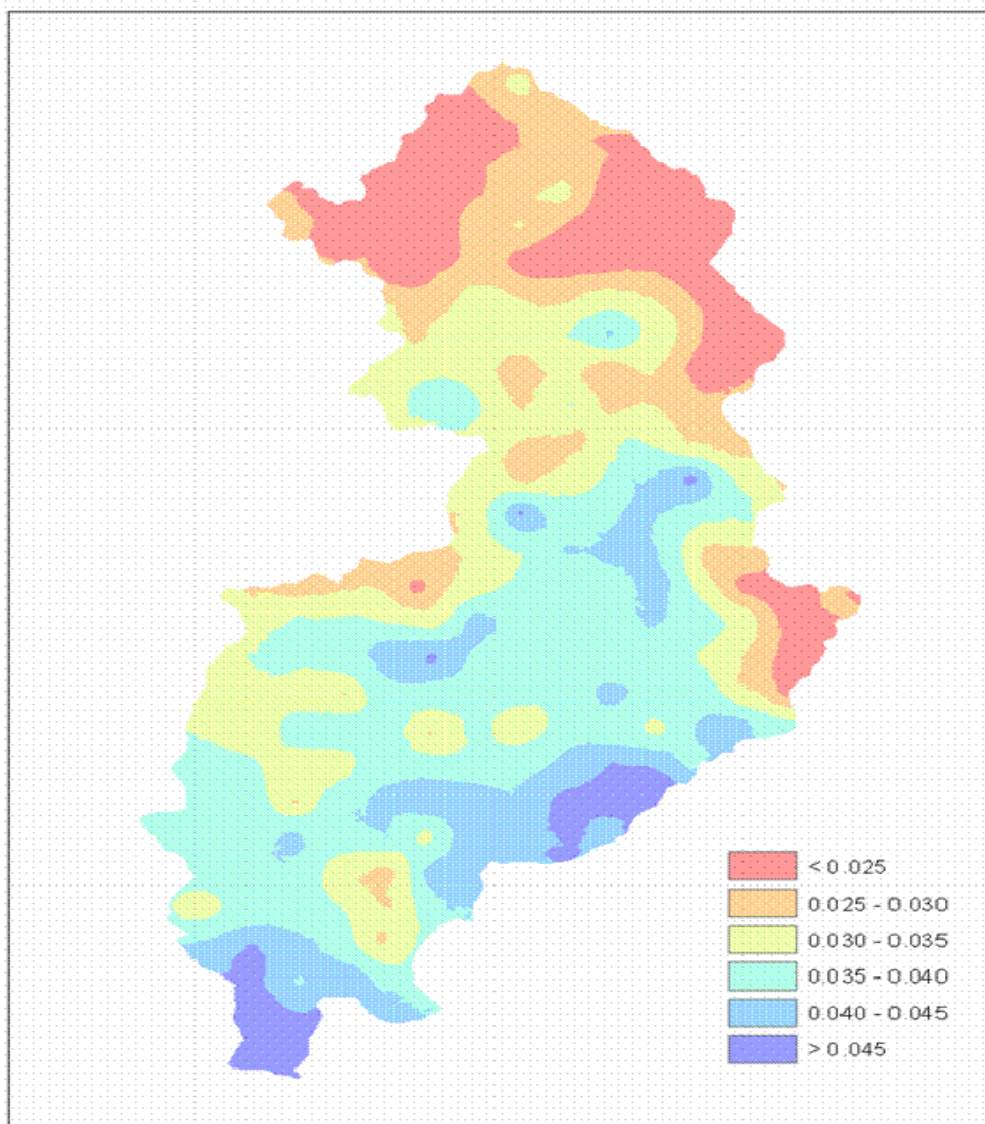


Fig. 8.16 - Répartition spatiale du facteur d'érodibilité du sol ( $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) dans le bassin de l'Imera méridional.

Les résultats obtenus mettent en évidence avant tout une sensible variabilité spatiale du facteur d'érodibilité pour les sols siciliens (gamme  $0.019 - 0.052 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , avec une valeur moyenne de  $0.034$ ); la Figure 8.16 montre également que les valeurs les plus élevées du facteur d'érodibilité, supérieures à  $0.045 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , se retrouvent dans la partie de moyennes vallées et de vallées du bassin avec des

pics localisés dans la zone de Mazzarino et la zone proche de l'embouchure (territoire de Licata).

Le produit de l'indice d'agressivité des pluies  $R$  par le facteur d'érodibilité du sol est une grandeur, exprimée en  $t\ ha^{-1}$ , dénommée en littérature «érosion potentielle».

La terminologie utilisée ne veut cependant pas indiquer qu'il s'agit de la valeur maximale de perte de sol qui peut potentiellement concerner un territoire étant donné que, bien que le facteur cultural et le facteur de procédure antiérosive réduisent la perte de sol, les facteurs topographiques sont plus souvent accroissants (quand la longueur libre du versant dépasse 22 m et la pente de la parcelle est supérieure à 9%). Autrement dit, même si le produit adimensionnel  $CP$  est toujours inférieur ou égal à un, les facteurs topographiques  $LS$  prennent des valeurs même supérieures à l'unité (dans les situations plus difficiles que celle de référence) et donc la perte de sol peut être supérieure à l'érosion potentielle.

Malgré cela, l'érosion potentielle  $RK$  est un terme de référence dans l'étude des processus érosifs et se prête à des enquêtes de type régional alors que l'évaluation des autres facteurs, notamment topographiques, dépend fortement de l'échelle de représentation choisie et nécessite, en tout cas, des études plus détaillées.

L'étude de la variabilité spatiale de l'érosion potentielle du sol  $RK$  ( $t\ ha^{-1}$ ) pour le bassin de l'Imera méridional a été réalisée par le biais du produit des deux couvertures, respectivement par les valeurs ponctuelles de  $R$  et de  $K$ .

En particulier la couverture des valeurs de l'indice d'agressivité des pluies  $R$  a été extraite de la carte des «isoérodants» régionaux (Fig. 8.17) qui représente actuellement pour le territoire sicilien l'information la plus détaillée disponible.

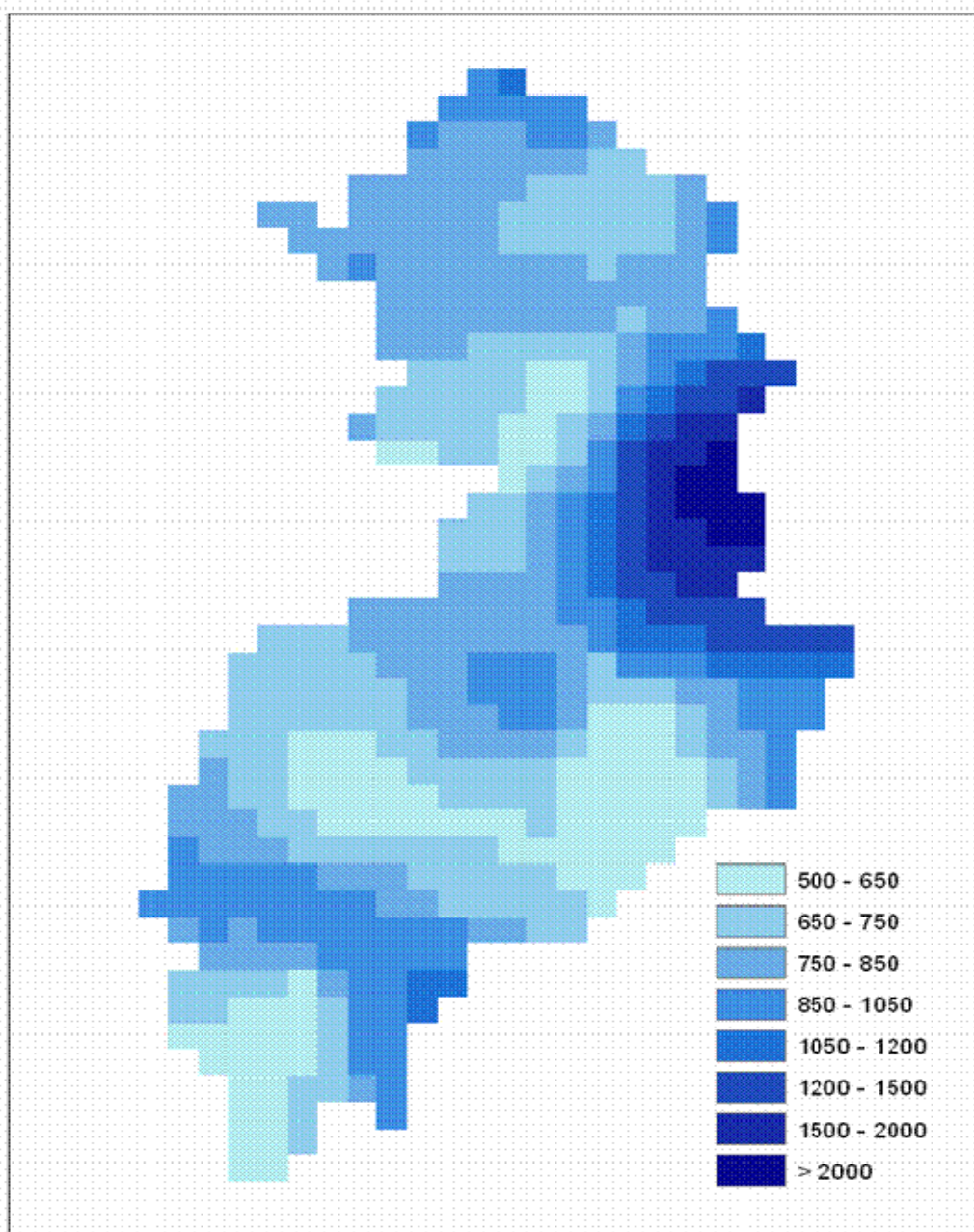


Fig. 8.17 - Carte des isoérodants ( $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ h^{-1}\ année^{-1}$ ) du bassin de l'Imera méridional.

La carte de la Figure 8.17 montre que, dans ce cas aussi, une sensible variabilité spatiale (*plage* 500 - 2513  $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ année^{-1}$ , avec une valeur moyenne de 849)

avec des valeurs maximales, supérieures à  $2000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ année}^{-1}$ , localisées au niveau de la ville d'Enna.

La couverture *raster*, produit des deux couvertures, indiquée en Figure 8.18, fournit pour chaque cellule carrée de la *mesh* de calcul la valeur de l'érosion potentielle.

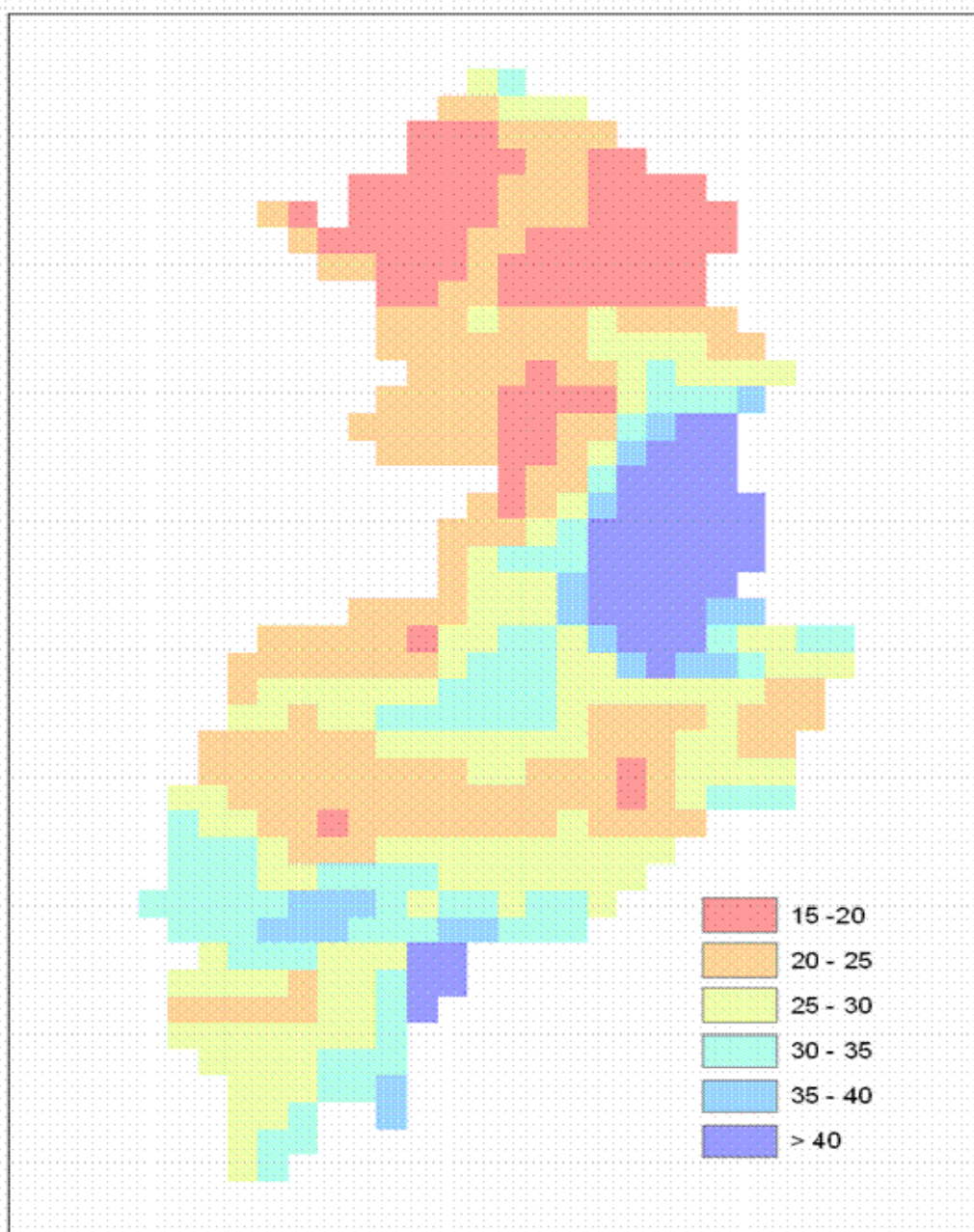


Fig. 8.18 - Carte de l'érosion potentielle (t ha<sup>-1</sup>) du bassin de l'Imera méridional.

Les résultats obtenus mettent en évidence avant tout une sensible variabilité spatiale de l'érosion potentielle dans le bassin de l'Imera méridional (*plage* 15 - 87.4 t

ha<sup>-1</sup>, avec une valeur moyenne de 28.2) avec des valeurs supérieures à 40 t ha<sup>-1</sup> au niveau d'une zone étendue qui se situe à proximité de l'agglomération d'Enna.

#### 8.4 Détermination de l'indice de qualité du sol pour le bassin du fleuve Imera méridional.

Dans la caractérisation de la qualité des sols pour le bassin de l'Imera méridional, aux fins de détermination des zones sensibles à la désertification, il a été pris en considération, comme pour l'enquête régionale (*Di Stefano, Ferro, 2007b*) les indicateurs représentatifs de l'érosion hydrique superficielle, de la profondeur du sol, de la pente des versants.

Le facteur d'érodibilité du sol de l'USLE a été considéré comme indicateur valide aux fins de l'enquête compte tenu qu'il synthétise les informations concernant la texture du sol, sa teneur en matière organique, la structure et la perméabilité.

Pour le bassin hydrographique de l'Imera méridional, concernant l'indicateur facteur d'érodibilité du sol, les six classes du Tableau 8.5 déterminées pour le territoire sicilien et qui respectent une variation linéaire de cet indicateur, ont été adoptées.

Classe	Punteggio	$K$ [t ha h ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> ]	Pendenza $s$	Spessore del suolo $p$
1	1.0	< 0.0059	< 0.05	Molto elevato
2	1.1	0.0059 - 0.0127	0.05 - 0.1	Da medio a elevato
3	1.2	0.0127 - 0.0196	0.1 - 0.2	Medio
4	1.4	0.0196 - 0.0334	0.2 - 0.3	Da sottile a medio
5	1.8	0.0334 - 0.0609	0.3 - 0.4	Da molto sottile a sottile
6	2.0	> 0.0609	> 0.4	Molto sottile

Tab. 8.5 - Scores relatifs aux classes du facteur d'érodibilité, de la pente et de la profondeur du sol.



L'épaisseur du sol  $p$  a été estimée sur la base des informations de la carte pédologique de la Sicile (*Fierotti et al.*, 1988) et, dans ce cas aussi, six classes ont été définies (Tab. 8.5).

La légende de la carte des sols de Fierotti et al. (1988), dont la seule portion relative au bassin de l'Imera méridional est représentée en Figure 8.19, indique pour chaque unité cartographique une plage de classes d'épaisseur (Tab. 8.6) déduites à partir de la classification en intervalles de profondeur indiqués dans le Tableau 8.7.

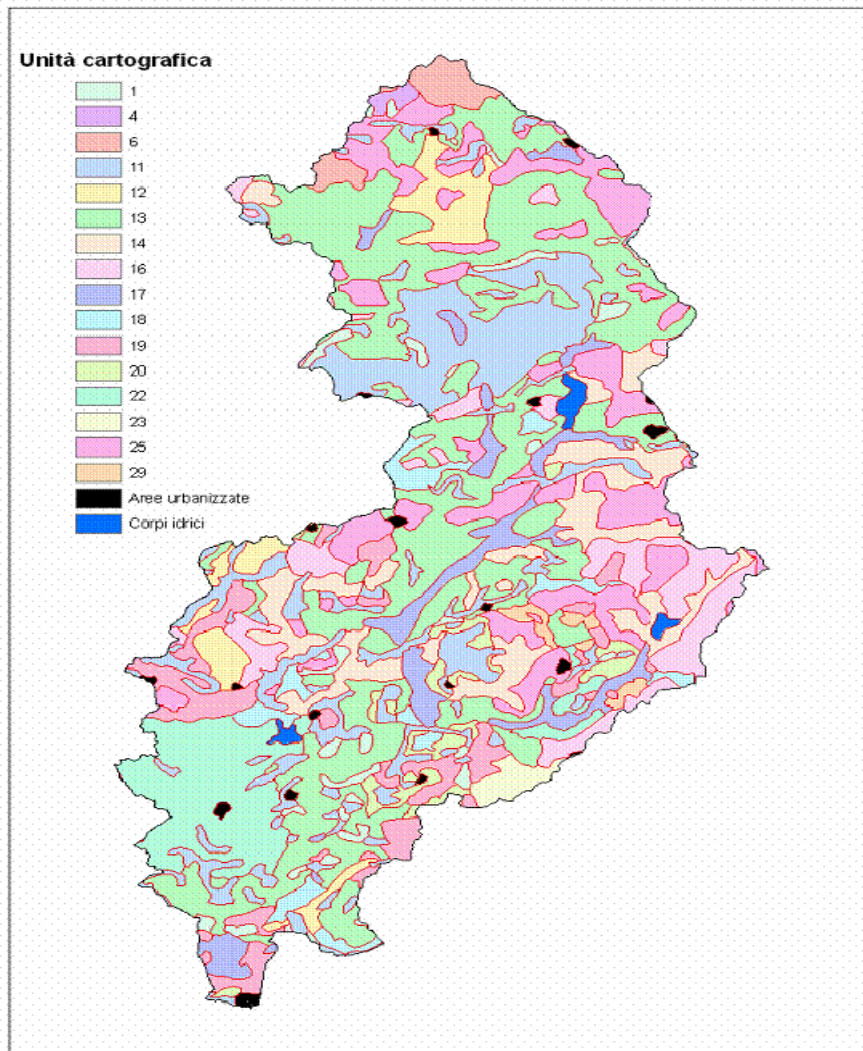


Fig. 8.19 - Carte pédologique du bassin de l'Imera méridional (*Fierotti et al.*, 1988).

Unità cartografica	Spessore
1	Molto sottile
4	Da sottile a molto sottile
6	Da molto sottile a medio
11	Da sottile a medio
12	Da sottile a molto elevato
13	Da sottile a medio
14	Da sottile a molto elevato
16	Da medio ad elevato
17	Molto elevato
18	Molto elevato
19	Molto elevato
20	Da medio a sottile
22	Da medio ad elevato
23	Medio
25	Da sottile a medio
29	Medio

Tab. 8.6 - Unités cartographiques de la carte des sols de Fierotti et al. (1988) s'inscrivant dans le bassin hydrographique de l'Imera méridional.

Spessore [cm]	Classificazione
0 - 20	Molto sottile
20 - 40	Sottile
40 - 80	Medio
80 - 100	Elevato
> 100	Molto elevato

Tab. 8.7 - Légende relative à la classification de l'épaisseur du sol indiquée dans la carte des sols de Fierotti et al. (1988).

La nécessité de disposer d'estimations de l'épaisseur du sol a nécessité la mise en œuvre d'une méthodologie qui permette de déduire la variabilité spatiale de cette variable à l'intérieur d'une unité cartographique de la carte des sols de Fierotti et al. (1988).

Bien que ces unités cartographiques soient des associations de sols et donc des agrégations qui comprennent des sols même très différents, celles-ci peuvent être considérées comme des unités de pédopaysage homogènes par climat et par complexe lithologique. Dans cette hypothèse, on peut dire que les facteurs topographiques soient déterminants, à l'intérieur de chaque association, pour la diversification en termes d'épaisseur.

Dans les modèles de l'érosion, et plus généralement de l'hydrologie, il a souvent été appliqué la variable topographique dénommée *Wetness Index*, *WI* (Moore et al., 1993; Gessler et al., 1995):

$$WI = \ln \left( \frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad [8.t]$$

où  $A_s$ , exprimée en  $m^2 \cdot m^{-1}$ , est en un point déterminé la zone contribuant à l'écoulement, en amont de ce point, rapportée à la largeur mesurée le long de la courbe de niveau et  $\tan \beta$  est la pente. Dans les zones planes ( $\beta = 0$ ) la valeur de *WI* est calculée en utilisant  $\beta = 0.001$ .

Des différents chercheurs ont trouvé des corrélations entre la profondeur du sol, ou des horizons pédogénétiques, et l'indice *WI* (McKenzie et al., 1999; McKenzie et al., 2000; Murphy et al., 2005; Tuteja et al., 2004).

Pour le bassin de l'Imera méridional, le calcul du *WI* a été effectué dans un environnement ESRI ArcView 9.1 en utilisant l'extension TAUDM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) qui recourt à la détermination de la direction d'écoulement, nécessaire au calcul de la surface unitaire  $A_s$ , de l'algorithme *Dinfinity* - D-inf (Tarboton, 1997).

Le Tableau 8.8 qui indique, pour l'ensemble du bassin de l'Imera méridional, les principales statistiques (valeur minimale Min, valeur maximale Max, Plage, valeur

moyenne, déviation *standard* STD) de la variable *WI*, montre une sensible similitude entre les différentes unités cartographiques.

Unità cartografica	Min	Max	Range	Media	STD
1	6	16	10	9.86	1.77
4	6	16	10	9.14	1.39
6	6	16	10	9.90	1.64
11	6	18	12	10.34	2.02
12	6	16	10	11.06	2.21
13	6	18	12	10.55	2.09
14	5	17	12	11.05	2.28
16	6	17	11	10.31	1.95
17	6	17	11	12.61	2.59
18	6	16	10	11.35	2.30
19	6	17	11	12.00	2.24
20	6	17	11	10.80	2.09
22	6	16	10	12.09	2.17
23	7	16	9	11.60	2.10
25	6	17	11	10.34	1.91
29	7	16	9	11.88	1.92

Tab. 8.8 - Statistiques du *WI* estimées pour chaque association de sols.

Le Tableau 8.9 indique, pour chaque unité cartographique, l'épaisseur moyenne du sol le plus fin  $p_{min}$ , présent dans l'association, l'épaisseur moyenne du sol le plus profond  $p_{max}$ , présent dans l'association, l'épaisseur moyenne  $p_{med}$ , du sol présent dans l'association calculée comme moyenne pondérée avec poids, le pourcentage de chaque de type de sol présent dans l'association.

Unità cartografica	$p_{min}$ [cm]	$p_{max}$ [cm]	$p_{med}$ [cm]
1	0	20	5
4	0	20	17.7
6	0	50	29
11	15	100	43
12	30	150	72
13	30	100	59
14	30	150	85
16	30	100	77
17	150	150	150
18	150	150	139.5
19	150	150	150
20	15	100	88
22	80	150	99
23	60	100	80.1
25	20	100	78
29	50	100	76.5

Tab. 8.9 - Paramètres d'épaisseur du sol relatifs aux différentes unités cartographiques.

En l'absence d'informations spécifique, il a été adopté une corrélation linéaire positive entre l'épaisseur du sol  $p$  et l'indice  $WI$ , le rapport suivant a notamment été utilisé:

$$\frac{p}{p_{med}} = \frac{WI}{\left( \frac{WI_{max} + WI_{min}}{2} \right)} \quad [8.u]$$

qui suppose que le rapport entre l'épaisseur du sol  $p$  relative à une cellule générique s'inscrivant dans une association préfixée et la valeur moyenne correspondante  $p_{med}$  soit égal au rapport entre l'indice  $WI$  de la cellule et la valeur moyenne correspondante

des cellules s'inscrivant dans l'association, égal à la moyenne arithmétique entre la valeur maximale  $W_{max}$  et la valeur minimale  $W_{min}$ .

La Figure 8.20 montre la répartition spatiale de l'épaisseur de sol, obtenue en utilisant les classes d'épaisseur indiquées dans le Tableau 8.10. Ce tableau indique, pour chaque classe de profondeur, aussi les valeurs correspondantes de l'épaisseur  $p$  et du score ESAS.

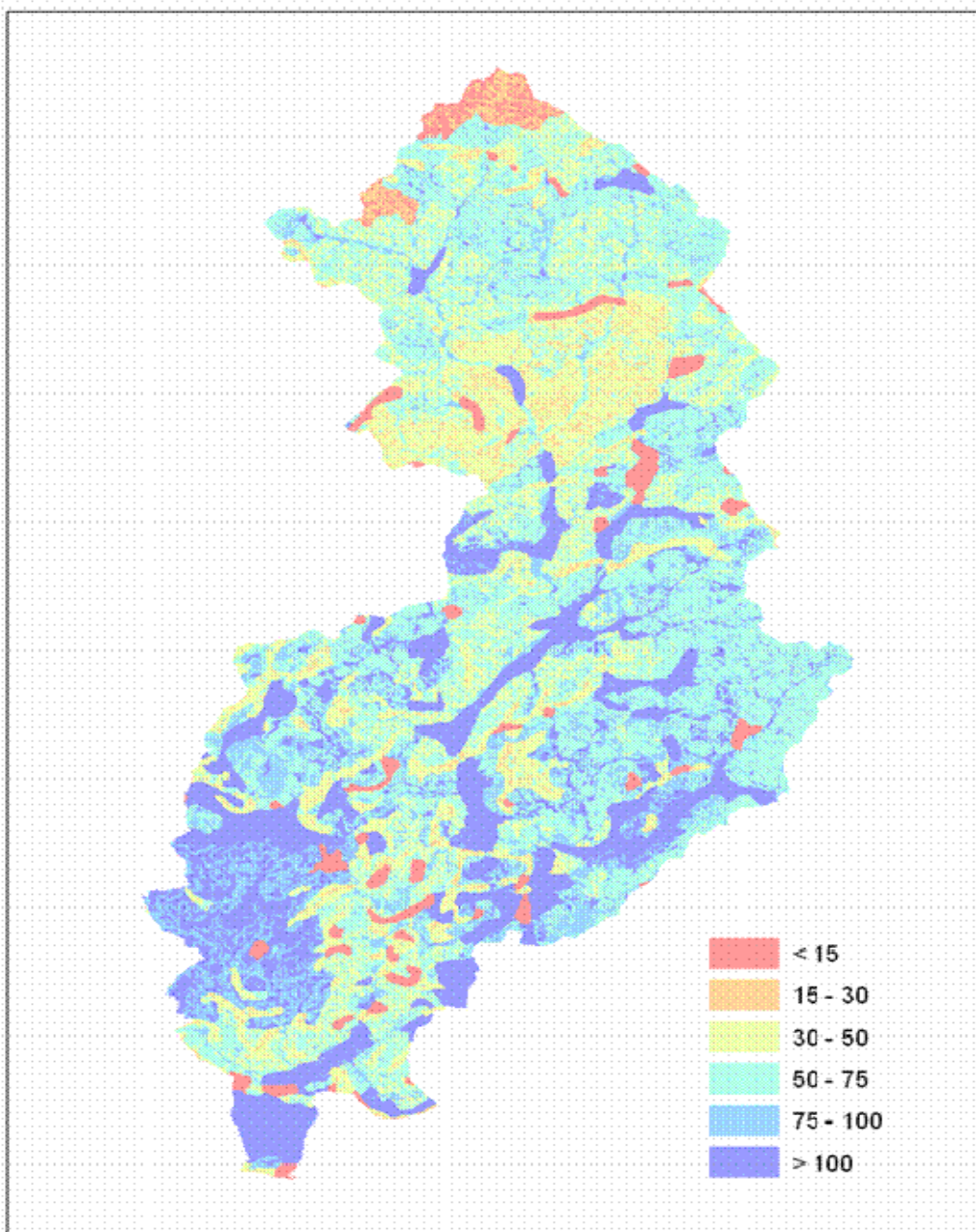


Fig. 8.20 - Répartition spatiale de l'épaisseur de sol.

Classe di spessore	Spessore $p$ [cm]	Punteggio
Molto sottile	< 15	2.0
Da molto sottile a sottile	15 - 30	1.8
Da sottile a medio	30 - 50	1.4
Medio	50 - 75	1.2
Da medio ad elevato	75 - 100	1.1
Molto elevato	> 100	1.0

Tab. 8.10 - Valeurs de l'épaisseur du sol et scores correspondants pour le bassin de l'Imera méridional.

La détermination de la pente  $s$  a été effectuée en recourant à un DTM régional disponible avec *mesh size* de 200 m. Les cinq premières classes de pente prises en considération (Tab. 8.5) concernent les valeurs de pente inférieures à 40%, cette dernière valeur étant en général considérée comme la limite de rentabilité économique pour une exploitation agricole de la zone considérée.

L'utilisation de la répartition spatiale du facteur d'érodibilité (Fig. 8.16), du modèle numérique du terrain (Fig. 8.21) et de l'épaisseur du sol (Fig. 8.20) a permis de calculer l'indice de qualité du sol  $SQI$  en recourant au rapport 8.v:

$$SQI = (K \cdot s \cdot p)^{1/3} \quad [8.v]$$

où  $K$  indique la valeur du score affectée au facteur d'érodibilité,  $s$  la valeur affectée à la pente et  $p$  la valeur déterminée pour l'épaisseur du sol sur la base des indications du Tableau 8.5.



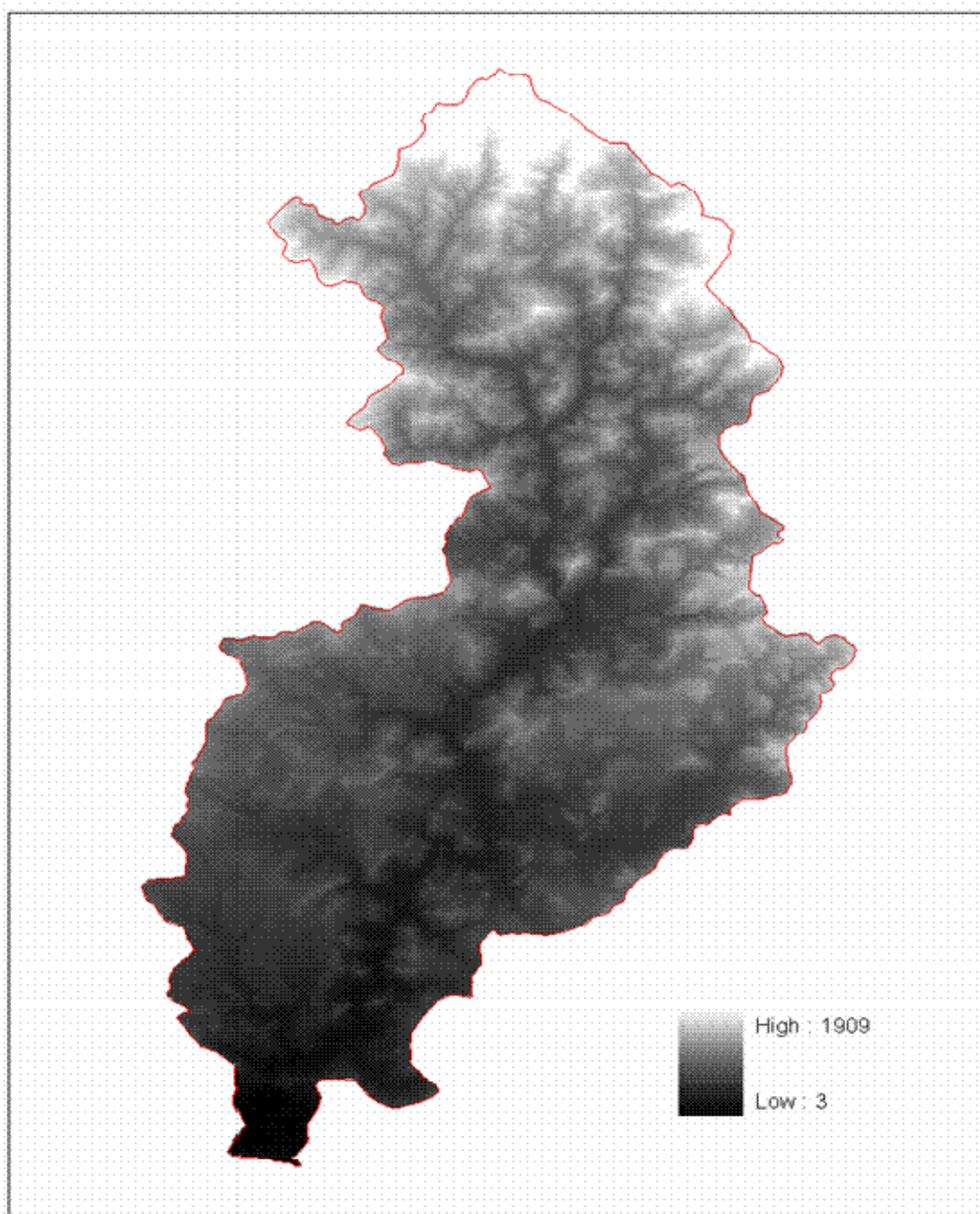


Fig. 8.21 - DTM du bassin de l'Imera méridional.

La répartition spatiale de l'indice *SOI*, avec les scores du Tableau 8.5, a conduit à la carte correspondante des classes de qualité de la Figure 8.22.

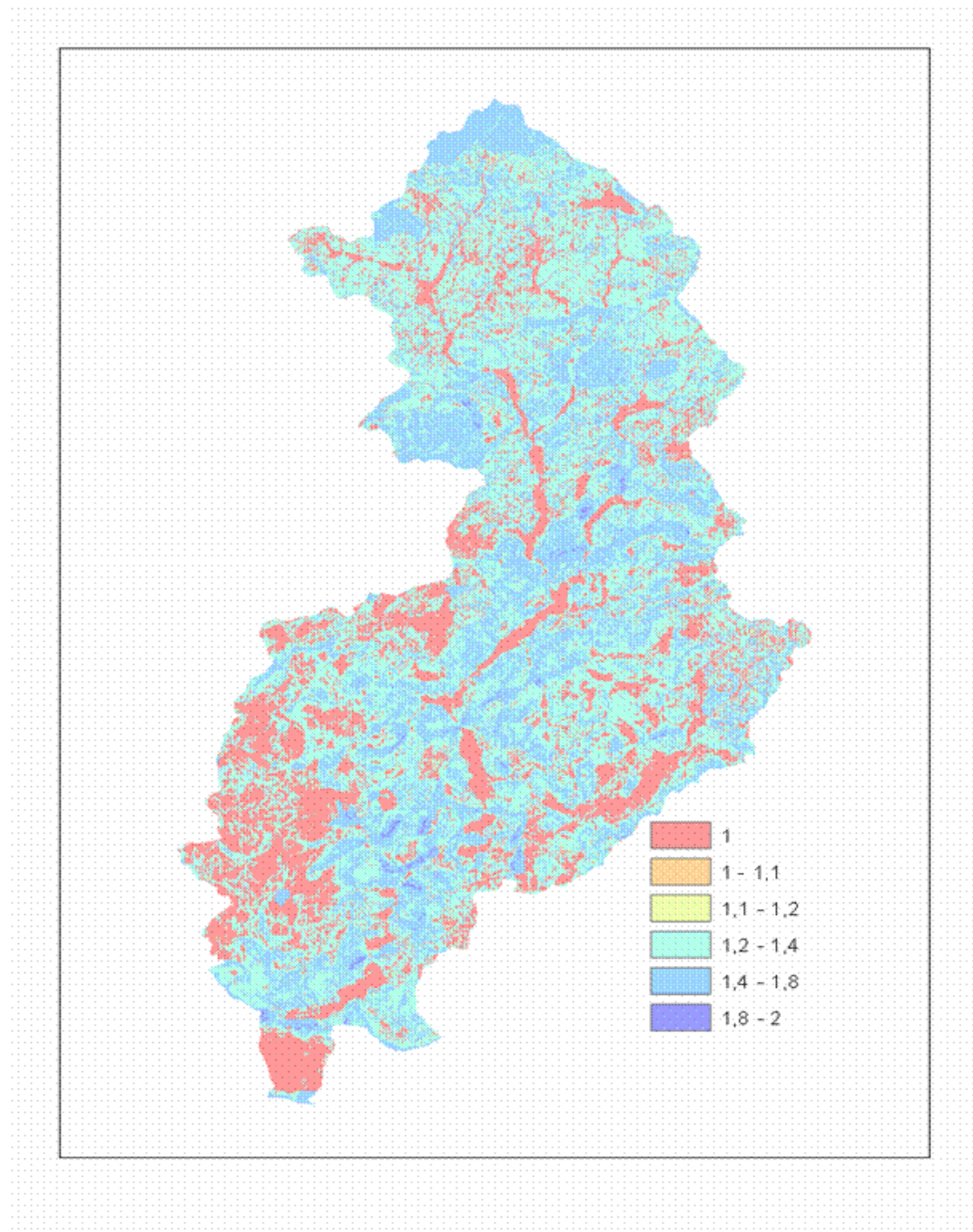


Fig. 8.22 - Carte des classes de qualité du sol du bassin de l'Imera méridional.

La carte du facteur de qualité du sol (Fig. 8.23) a été déduite en adoptant, une nouvelle fois, l'hypothèse de linéarité dans les valeurs à associer aux extrêmes qui distinguent les trois classes de qualité (Haute qualité  $SQI < 1.13$ , qualité Moyenne  $SQI$  de 1.13 à 1.45, Basse qualité  $SQI > 1.45$ ), qui est par ailleurs utilisée dans la formulation originelle du modèle ESAs (*Bagarello, Ferro, 2006*).

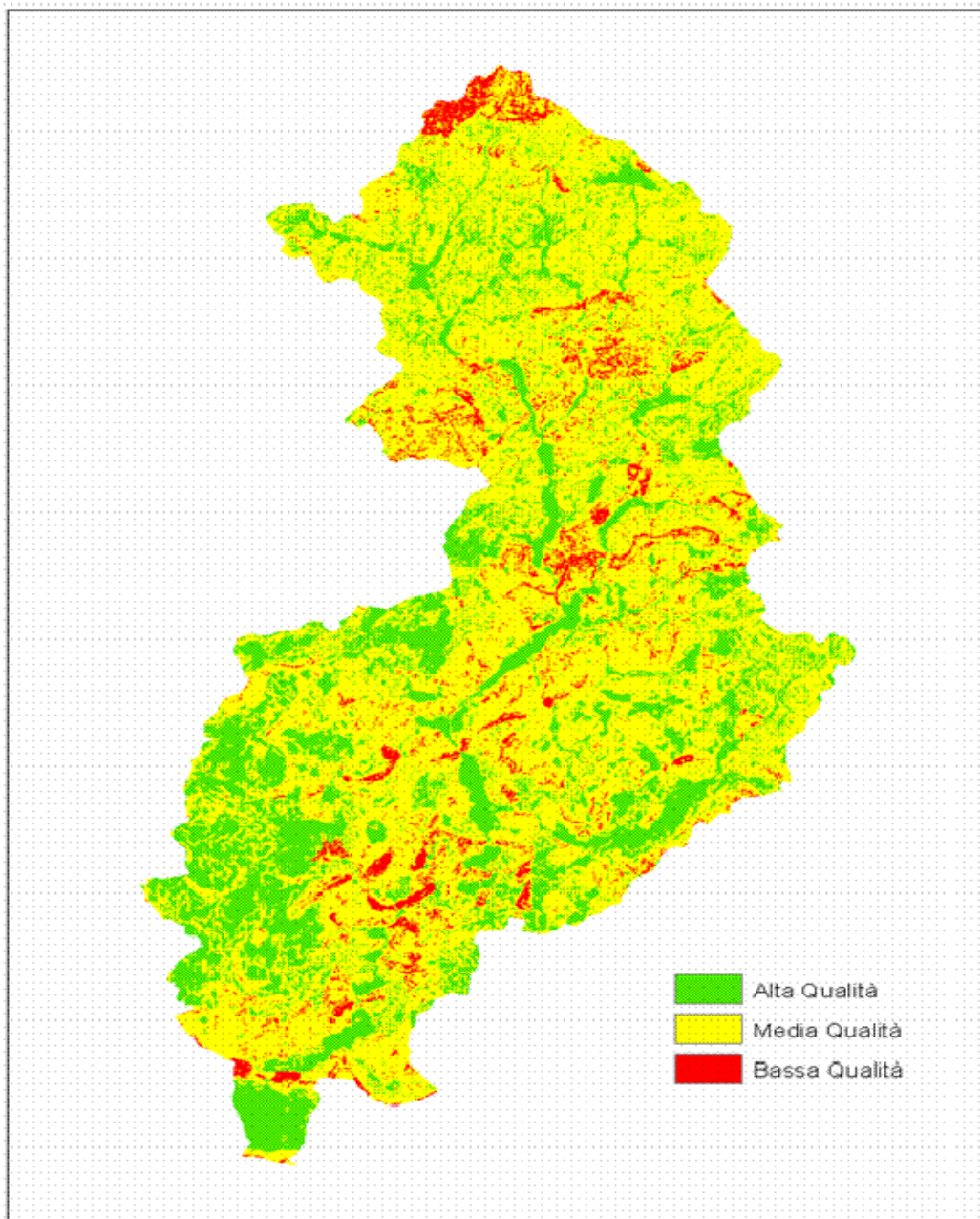


Fig. 8.23 - Carte du facteur de qualité du sol du bassin de l'Imera méridional.

La carte de la Figure 8.23 met en évidence pour le bassin de l'Imera méridional une nette prédominance des zones concernées par des sols de qualité moyenne et

basse. En particulier, des sols de haute qualité s'inscrivent sur 26% de la superficie du bassin alors que 69% et 5% de la zone sont respectivement des sols de moyenne et basse qualité.

### **8.5 Détermination de l'indice de qualité du climat pour le bassin du fleuve Imera méridional.**

Dans la caractérisation de la qualité du climat pour le bassin de l'Imera méridional, aux fins de détermination des zones sensibles à la désertification, il a été pris en considération, compte tenu des résultats obtenus pour l'enquête régionale (*Di Stefano, Ferro, 2007b*) les indicateurs représentatifs de l'aridité et de l'érosion hydrique superficielle.

Pour le calcul de l'indice de qualité *CQI* du climat, on a notamment eu recours au rapport 8.w:

$$CQI = \sqrt{DP \cdot R} \quad [8.w]$$

où l'on a pris comme indicateur d'aridité la valeur moyenne annuelle du déficit pluviométrique *DP* et comme indicateur de sévérité des processus érosifs la valeur moyenne annuelle du facteur climatique *R* de Wischmeier et Smith (1978).

La répartition spatiale du déficit pluviométrique et la carte des isoérodants (Fig.8.17) ont permis de définir la répartition spatiale de l'indice *CQI*, avec les scores des Tableaux 8.11 et 8.12, et a conduit à la carte correspondante des classes de qualité de la Figure 8.24.

Classe	Punteggio	Distribuzione non lineare	Distribuzione lineare
1	1.0	< 512	< 512
2	1.1	512 - 768	512 - 603
3	1.2	768 - 1039	603 - 694
4	1.4	1039 - 1167	694 - 876
5	1.8	1167 - 1295	876 - 1240
6	2.0	> 1295	> 1240

Tab. 8.11 - Scores relatifs à l'indicateur *déficit* pluviométrique (mm).

Classe	Punteggio	Distribuzione non lineare	Distribuzione lineare
1	1.0	< 1345	< 1345
2	1.1	1345 - 2025	1345 - 1583
3	1.2	2025 - 2723	1583 - 1821
4	1.4	2723 - 3064	1821 - 2298
5	1.8	3064 - 3404	2298 - 3268
6	2.0	> 3404	> 3268

Tab. 8.12 - Scores relatifs à l'indicateur agressivité des précipitations ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ).

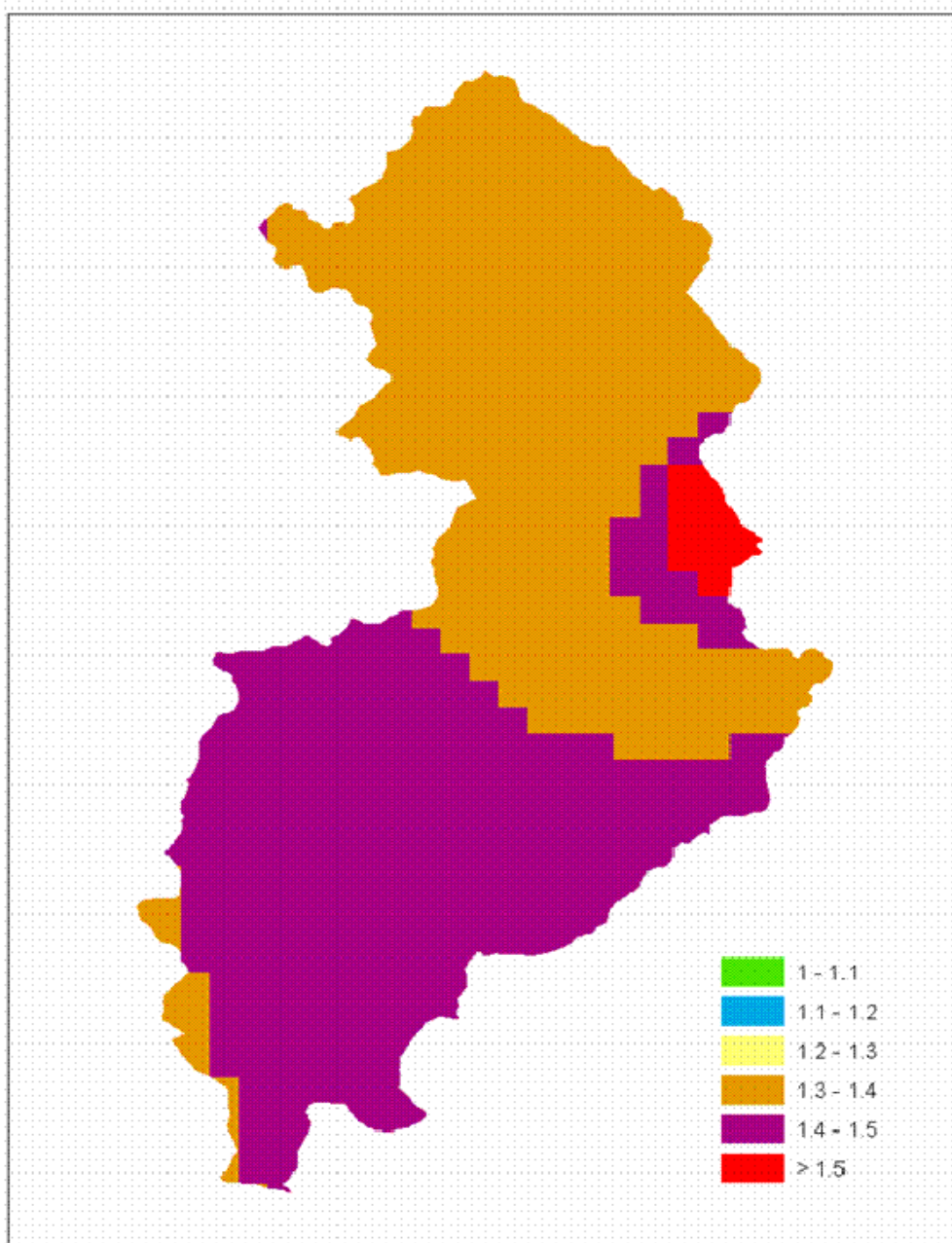


Fig. 8.24 - Carte des classes de qualité du climat du bassin de l'Imera méridional.

En adoptant, une nouvelle fois, l'hypothèse de linéarité dans les valeurs à associer aux extrêmes qui distinguent les trois classes de qualité (Haute qualité  $CQI < 1.15$ ,



qualité Moyenne  $CQI$  de 1.15 à 1.5, Basse qualité  $CQI > 1$ . - *Di Stefano, Ferro, 2007b*)  
il a été obtenu la carte du facteur de qualité du climat indiquée en Figure 8.25.

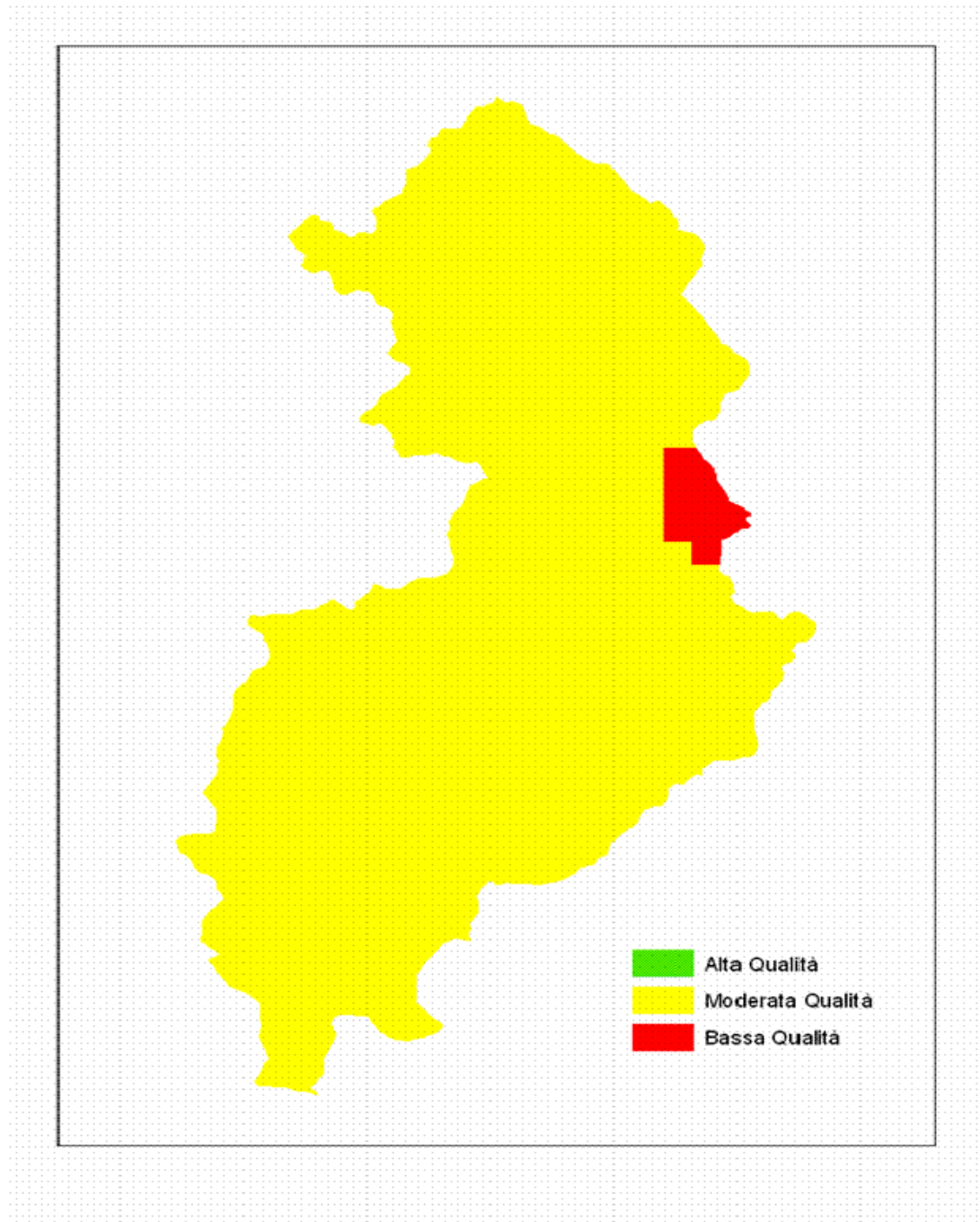


Fig. 8.25 - Carte du facteur de qualité du climat du bassin de l'Imera méridional.



La carte de la Figure 8.25 met en évidence que le bassin de l’Imera méridional est concerné dans sa quasi totalité, à l’exception d'une zone de basse qualité climatique correspondant à une zone proche de l’agglomération d’Enna, par des zones caractérisées par une qualité de climat moyenne.

### **8.6 Détermination des zones sensibles à la désertification pour le bassin du fleuve Imera méridional.**

De façon analogue à la méthodologie développée pour toute la région sicilienne (*Di Stefano, Ferro, 2007b*) il a été utilisé la définition de l’indice *ESAI* correspondant à l’unique caractérisation climatique et pédologique en recourant au rapport 8.x:

$$ESAI = (CQI \cdot SQI)^{1/2} \quad [8.x]$$

et les limites de classe utilisées pour la Région Sicile (Non touchée  $ESAI < 1.17$ , Potentielle  $1.17 < ESAI < 1.23$ , Fragile  $1.23 < ESAI < 1.37$ , Critique  $ESAI > 1.37$ ) ont été adoptées.

La carte de la figure 8.26, qui montre la division du bassin hydrographique de l’Imera méridional en zone à différente *ESAI*, met en évidence une nette prédominance des zones fragiles et critiques du point de vue climatique et pédologique qui touchent 75% de la superficie du bassin. 15% de la superficie restante du bassin présente des zones potentiellement sensibles au phénomène de la désertification et 10% des zones non touchées.

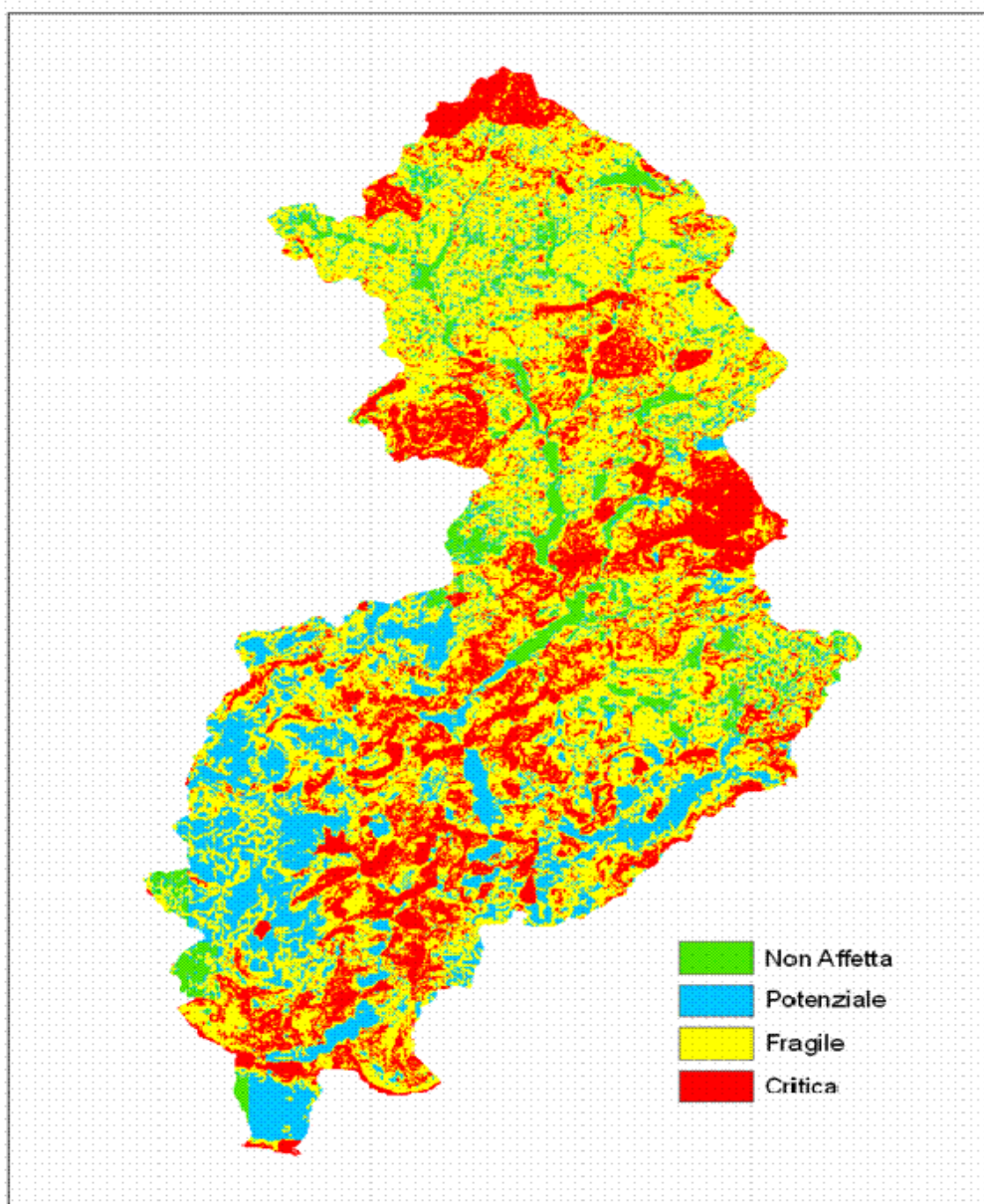


Fig. 8.26 - Carte de l'indice *ESAI* correspondant à l'unique caractérisation climatique et pédologique.

En conclusion, au moins 90% de la superficie du bassin du fleuve Imera méridional est sensible, à différents degrés de sévérité (potentiel, fragile, critique) au phénomène de désertification imputable à des causes climatiques et pédologiques.

**Annexe 8.1 - Données caractéristiques des 228 échantillons prélevés pour détermination du facteur d'érodibilité du sol.**

Campione	Data Prelievo [gg:mm:aa]	Coordinata N [m]	Coordinata E [m]	Uso del suolo
1	29:06:07	4189430	419000	Bosco
2	29:06:07	4189465	421325	Bosco
3	9:05:07	4185655	415872	Incolto
4	9:05:07	4196900	418760	Bosco
5	29:06:07	4186460	421685	Bosco
6	29:06:07	4186540	424600	Incolto
7	9:05:07	4183670	415660	Pascolo
8	9:05:07	4183475	418685	Sulla
9	29:06:07	4183430	421985	Seminativo
10	29:06:07	4183710	425315	Incolto
11	29:06:07	4183600	428520	Incolto
12	29:06:07	4182250	413140	Fieno
13	23:06:07	4180125	406160	Incolto
14	23:06:07	4180250	412060	Suolo nudo
15	29:06:07	4180580	415940	Incolto
16	29:06:07	4180560	418720	Incolto
17	29:06:07	4180425	421825	Fieno
18	29:06:07	4180500	424515	Fieno
19	19:07:07	4180460	427320	Fieno
20	19:07:07	4180540	429920	Seminativo
21	19:07:07	4180700	433035	Incolto

22	23:06:07	4177550	407210	Seminativo
23	23:06:07	4177615	409640	Seminativo
24	23:06:07	4177800	412530	Incolto
25	29:06:07	4177750	415730	Prato
26	29:06:07	4177475	418690	Boscaglia
27	29:06:07	4177675	421630	Seminativo
28	29:06:07	4177670	424665	Fieno
29	19:07:07	4177325	427825	Prato
30	19:07:07	4177590	430860	Prato
31	19:07:07	4177690	433485	Prato
32	23:06:07	4174925	411090	Seminativo
33	19:07:07	4175220	415355	Suolo nudo lavorato
34	19:07:07	4174800	418180	Seminativo
35	19:07:07	4174675	421725	Seminativo lavorato
36	19:07:07	4174675	424350	Seminativo
37	19:07:07	4174580	427150	Seminativo
38	19:07:07	4174590	430450	Prato
39	9:06:07	4174320	432780	Pascolo
40	23:06:07	4173100	413410	Fieno
41	15:06:07	4171075	412850	Prato
42	15:06:07	4171535	415350	Avena
43	15:06:07	4171730	418925	Seminativo
44	15:06:07	4171475	421640	Seminativo
45	15:06:07	4171670	424325	Seminativo
46	15:06:07	4171690	427190	Uliveto

47	9:06:07	4161650	430760	Fieno
48	9:06:07	4171725	433725	Fieno
49	9:06:07	4171735	436070	Incolto
50	15:06:07	4168370	414600	Seminativo
51	15:06:07	4168420	418115	Seminativo
52	15:06:07	4168940	421356	Sulla
53	15:06:07	4168380	424870	Seminativo
54	15:06:07	4168575	427560	Bosco
55	15:06:07	4168780	431240	Seminativo
56	9:06:07	4169002	434160	Incolto
57	9:06:07	4167700	436500	Incolto
58	9:06:07	4168840	439125	Bosco
59	23:06:07	4165925	412475	Fieno
60	23:06:07	4165790	415240	Seminativo
61	23:06:07	4165530	418070	Suolo nudo
62	15:06:07	4165500	421150	Seminativo
63	15:06:07	4167290	424819	Sulla
64	9:06:07	4165425	427475	Prato pascolo
65	9:06:07	4165535	430385	Fieno
66	9:06:07	4165600	434020	Gariga
67	9:06:07	4165800	436490	Incolto
68	23:06:07	4162465	412765	Seminativo
69	23:06:07	4162725	415610	Mandorleto
70	23:06:07	4162690	418560	Mandorleto
71	2:06:07	4162565	421690	Seminativo

72	2:06:07	4162715	425080	Suolo Lavorato
73	9:06:07	4162625	427620	Prato pascolo
74	9:06:07	4162700	430310	Seminativo
75	9:06:07	4162525	433860	Seminativo
76	2:06:07	4159715	421615	Colture erbacee
77	2:06:07	4159750	425510	Incolto
78	2:06:07	4159795	428850	Eucalipto
79	2:06:07	4159350	432649	Incolto
80	18:05:07	4159430	435690	Eucalipteto
81	2:06:07	4156600	418140	Colt. erbacee
82	2:06:07	4156730	421900	Prato pascolo
83	2:06:07	4156640	426050	Avena
84	18:05:07	4156605	429190	Leguminose
85	18:05:07	4156510	433030	Mandorleto
86	18:05:07	4156425	436700	Prato Pascolo
87	28:04:07	4153670	418400	Seminativo
88	28:04:07	4153600	421575	Incolto
89	28:04:07	4152900	425180	Prateria Ampelodesma
90	18:05:07	4153570	428685	Eucalipteto
91	18:05:07	4153250	433605	Erbacee (fieno)
92	18:05:07	4153275	436850	Erbacee (fieno)
93	28:04:07	4150320	418350	Eucalipteto
94	28:04:07	4150530	421730	Seminativo
95	28:04:07	4150720	424710	Suolo Lavorato
96	18:05:07	4150510	427560	Seminativo

97	18:05:07	4150615	430150	Suolo lavorato
98	18:05:07	4150179	434323	Incolto
99	18:05:07	4150325	436615	Pascolo
100	28:04:07	4147154	403615	Incolto
101	28:04:07	4147620	403603	Uliveto
102	28:04:07	4147450	409258	Seminativo
103	28:04:07	4147436	412698	Agrumeto
104	28:04:07	4147400	414590	Agrumeto
105	28:04:07	4147776	418830	Pascolo
106	28:04:07	4147600	421625	Leguminose
107	18:05:07	4147950	424700	Pascolo
108	18:05:07	4147575	427175	Seminativo
109	18:05:07	4147700	430860	Incolto
110	1:08:07	4147635	433700	Uliveto
111	1:08:07	4147520	436800	Incolto
112	1:08:07	4147380	439700	Bosco Eucalipto
113	1:08:07	4146175	442375	Bosco Pino
114	18:05:07	4144500	403485	Seminativo
115	28:04:07	4144610	406830	Seminativo
116	7:08:07	4144425	409710	Seminativo
117	8:08:07	4144675	412610	Seminativo
118	8:08:07	4144590	415810	Seminativo lavorato
119	8:08:07	4144685	418640	Seminativo
120	8:08:07	4144440	421755	Seminativo
121	8:08:07	4144440	424640	Seminativo

122	8:08:07	4144750	427615	Seminativo bruciato
123	1:08:07	4144670	430550	Seminativo
124	1:08:07	4144640	433610	Seminativo
125	1:08:07	4144640	436560	Pascolo
126	1:08:07	4144400	440875	Bosco Eucalipto
127	7:08:07	4141380	404167	Seminativo
128	7:08:07	4141400	405910	Seminativo
129	8:08:07	4141415	409485	Seminativo
130	8:08:07	4141907	412850	Vigneto
131	8:08:07	4141610,	415675	Suolo nudo lavorato
132	7:08:07	4141047	419514	Suolo nudo lavorato
133	7:08:07	4141740	421600	Seminativo
134	7:08:07	4141525	424770	Vigneto
135	7:08:07	4141560	427510	Uliveto
136	7:08:07	4141600	430610	Suolo nudo lavorato
137	7:08:07	4141660	433615	Mandorleto
138	1:08:07	4141465	436300	Uliveto
139	1:08:07	4141540	439610	Mandorleto
140	31:08:07	4138625	400760	Seminativo
141	7:08:07	4138740	403625	Vigneto
142	8:08:07	4138760	406824	Pescheto
143	31:08:07	4138475	409725	Incolto
144	8:08:07	4138675	412660	Uliveto
145	8:08:07	4138650	415570	Suolo nudo lavorato
146	8:08:07	4138490	418675	Seminativo



147	7:08:07	4138530	421680	Mandorleto
148	7:08:07	4138500	424525	Seminativo bruciato
149	7:08:07	4138525	427510	Lavorato
150	7:08:07	4138605	430560	Uliveto
151	1:08:07	4138725	433575	Seminativo lavorato
152	1:08:07	4138844	435807	Uliveto
153	1:08:07	4138690	439490	Incolto
154	31:08:07	4135650	400530	Seminativo
155	31:08:07	4135785	403500	Incolto
156	31:08:07	4135680	406685	Seminativo
157	8:08:07	4135600	409430	Seminativo
158	8:08:07	4135700	412360	Vigneto
159	8:08:07	4135270	415630	Seminativo
160	8:08:07	4135650	418800	Seminativo
161	7:08:07	4136024	421637	Seminativo
162	7:08:07	4135234	425091	Mandorleto
163	7:08:07	4135715	427425	Uliveto
164	7:08:07	4135710	430590	Pascolo
165	1:08:07	4135665	433275	Lavorato
166	1:08:07	4135610	435770	Seminativo
167	1:08:07	4135625	439110	Incolto lavorato
168	31:08:07	4132525	400475	Mandorleto
169	31:08:07	4132740	403375	Mandorleto
170	21:08:07	4132520	406810	Seminativo
171	21:08:07	4132675	409585	Seminativo

172	21:08:07	4132810	412440	Seminativo
173	21:08:07	4132275	416011	Seminativo
174	21:08:07	4132890	418600	Seminativo
175	21:08:07	4132750	421425	Vigneto
176	21:08:07	4132670	424650	Seminativo
177	21:08:07	4132775	427650	Mandorleto
178	21:08:07	4132625	430450	Suolo nudo lavorato
179	21:08:07	4132660	433350	Mandorleto
180	31:08:07	4129575	400315	Vigneto
181	31:08:07	4129585	403350	Vigneto
182	31:08:07	4129550	406485	Seminativo
183	22:08:07	4129510	409378	Seminativo
184	21:08:07	4129785	412558	Vigneto
185	21:08:07	4129660	415683	Incolto
186	21:08:07	4129600	418558	Vigneto
187	21:08:07	4129620	421418	Vigneto
188	21:08:07	4132595	424508	Mandorleto
189	21:08:07	4129755	427568	Orto in pieno campo
190	21:08:07	4129915	430418	Mandorleto
191	22:08:07	4126425	397770	Mandorleto
192	22:08:07	4126475	400385	Seminativo
193	22:08:07	4126640	403535	Vigneto
194	22:08:07	4126713	406320	Vigneto
195	22:08:07	4126625	409458	Seminativo
196	22:08:07	4126635	412618	Seminativo

197	22:08:07	4126665	415287	Seminativo
198	22:08:07	4126345	418368	Uliveto
199	22:08:07	4126755	421608	Vigneto
200	22:08:07	4126655	424508	Uliveto
201	22:08:07	4126745	427638	Uliveto
202	31:08:07	4123505	400580	Vigneto
203	31:08:07	4123575	403515	Mandorleto
204	31:08:07	4123710	406740	Seminativo
205	22:08:07	4123680	409547	Mandorleto
206	22:08:07	4123615	412637	Seminativo
207	22:08:07	4123415	415568	Seminativo
208	22:08:07	4123530	418558	Suolo nudo
209	31:08:07	4120650	400125	Vigneto
210	31:08:07	4120460	403615	Frutteto
211	31:08:07	4120690	406535	Seminativo
212	30:08:07	4120098	409573	Mandorleto
213	30:08:07	4121104	412857	Bosco
214	30:08:07	4120310	415950	Vigneto
215	30:08:07	4117660	400560	Vigneto
216	30:08:07	4117440	403600	Vigneto
217	30:08:07	4117400	406560	Vigneto
218	30:08:07	4117445	409463	Incolto
219	30:08:07	4118025	412320	Bosco
220	30:08:07	4114640	403520	Uliveto
221	30:08:07	4114430	406760	Seminativo

222	30:08:07	4114465	409758	Vigneto
223	30:08:07	4114605	412663	Seminativo
224	30:08:07	4111490	403560	Suolo nudo
225	30:08:07	4111520	406770	Suolo nudo
226	30:08:07	4111620	413278	Seminativo
227	30:08:07	4108550	403560	Suolo nudo
228	30:08:07	4108580	406730	Suolo nudo

## BIBLIOGRAPHIE

- ABDULLA F.A., LETTENMAIER D.P., Application of regional parameters estimation schemes to simulate the water balance of a large continental river, *Journal of Hydrology* 197, 1997.
- ABRAHAMS A.D., PARSONS A.J., *Rill hydraulics on a semiarid hillslope, Southern Arizona*. Earth Surface Processes and Landforms, 1996.
- ADAMOWSKI K., BOUGADIS J., *Detection of trends in annual extreme rainfall*, Hydrological processes 17, 2003.
- AGASSI M., BRADFORD J.M., *Methodologies for interrill erosion studies*, Soil & Tillage Research, 49, 1999.
- AGNESE C., BAGARELLO V., NICASTRO G., *Alterazione di alcuni caratteri del regime pluvio-termometrico siciliano nel periodo 1916-1999*, Atti convegno AIAM, 2002.
- ANGELL J.K., *Variations and Trends in Tropospheric and Stratospheric Global Temperatures, 1958–87*, *Journal of Climate*, vol. 1, 1988.
- AQUATER S.P.A., *Studio sull'utilizzazione delle acque dei fiumi Platani, Imera Meridionale e loro affluenti*, Rapporto conclusivo, San Lorenzo in Campo, 1982.
- ARNELL N.W., *Grid Mapping and River Discharge*, *Journal of Hydrology*, n.167, 1995.
- ARNELL N.W., *A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain*, *Journal of Hydrology*, n.217, 1999.
- ARNELL N.W., *Climate change and global water resources*, *Global Environmental Change* 9, 1999.
- ARNELL N.W., *The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective*, *Global Environmental Change* 9, 1999.
- ARONICA G., CANNAROZZO M., NOTO L.V., *Investigating the change in extreme rainfall series recorded in a urbanised area*, *Water Science and Technology*, 45, 2002.
- ARONICA G., FERRO V., *Rainfall erosivity over the Calabrian region*, *Journal of Hydrological Sciences*, 42, 1997.
- ASSESSORATO DELL'AGRICOLTURA E DELLE FORESTE, Circolare 29/03/94, n.1, *Disposizioni attuative del programma pluriennale regolamento CEE n.2080/92 (misure forestali nel settore agricolo)*.
- ASSESSORATO DELL'AGRICOLTURA E DELLE FORESTE, Programma Pluriennale Regionale Reg. CEE 2080/92.
- ASSESSORATO DELL'AGRICOLTURA E DELLE FORESTE, Valutazione Intermedia del Piano di Sviluppo Rurale 2000-2006 Sicilia - Aggiornamento del Rapporto di Valutazione Intermedia.

- AUBERVILLE A., *Climate, Forests, et Desertification de l'Afrique Tropicale Societe des Editions Geographique*, Maritimes et Coloni, 1949.
- AZIENDA FF.DD.R.S., *Inventario dei complessi boscati*, Palermo, 1976.
- AZIENDA FF.DD.R.S., *Censimento dei complessi boscati della Regione Siciliana*, Palermo, 1985.
- BAGARELLO V., BAIAMONTE G., FERRO V., GIORDANO G., *Evaluating the topographic factors for watershed soil erosion studies*, Proc. of Workshop on Soil Erosion in Semi-arid Mediterranean Areas, Ed. Morgan R.P.C., 1993.
- BAGARELLO V., BAIAMONTE G., FERRO V., GIORDANO G., *Contributo alla valutazione dei fattori elementari dell'erosione negli studi a scala di bacino*, Quaderni di Idronomia Montana, 15, 1996.
- BAGARELLO V., DI PIAZZA G.V., FERRO V., *Manual sampling and tank size effects on the calibration curve of plot sediment storage tanks*, Transactions of the ASAE, 47(4), 2004.
- BAGARELLO V., DI PIAZZA G.V., FERRO V., *Monitoraggio della perdita di suolo a differenti scale spaziali nell'area di Sparacia*, Rivista di Ingegneria Agraria, 1, 2004.
- BAGARELLO V., DI PIAZZA G.V., FERRO V., GIORDANO G., *Monitoraggio della perdita di suolo nell'area sperimentale di Sparacia*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- BAGARELLO V., FERRO V., *Calibrating storage tanks for soil erosion measurement from plots*, Earth Surface Processes and Landforms, 23, 1998.
- BAGARELLO V., FERRO V., *Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy)*, Hydrological Processes, 18, 2004.
- BAGARELLO V., FERRO V., *Erosione e conservazione del suolo*, Ed. McGraw-Hill, Milano, 2006.
- BAGARELLO V., FERRO V., GIORDANO G., *Contributo alla valutazione del fattore di deflusso di Williams e del coefficiente di resa solida per alcuni bacini idrografici siciliani*, Rivista di Ingegneria Agraria, 4, 1991.
- BAGARELLO V., FERRO V., GIORDANO G., *Misure di perdita di suolo a scala parcellare nell'area sperimentale di Sparacia*, Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 2003.
- BAGARELLO V., FERRO V., GIORDANO G., MINACAPILLI M., *Indagini sperimentali sui deflussi e sull'erosione idrica nei piccoli bacini*, Proceedings Regional Workshop "POP Sicilia - Cartografia Tematica, Morfologia delle Coste, Erosione del Suolo e Gestione dei Sedimenti", Mègier J., Falving S., Baracchini M.L. Eds., Palermo, Italy: Space Applications Institute, Environmental Mapping and Modelling Unit, Centro Comune di Ricerca di ISPRA della Commissione Europea, 1996.

- BAGNARESI U., *Il recupero dei terreni marginali in collina e in montagna*, Agricoltura Ricerca 3, 1979.
- BAGNOULS F., GASSEN H., *Saison sèche et indice xérothermique*, Doc. Pour les cartes des prod. Vég, série Généralités III , 1953.
- BAIAMONTE G., FERRO V., *Indagine sperimentale su un semplice misuratore di portata per correnti a pelo libero su fondo inclinato*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- BAKER P.S., *Basic principles and application techniques of isotope tracers*, Transactions of the ASAE, 10, 1967.
- BALLATORE, G.P., *Salinità delle acque e prospettive dell'irrigazione della Piana di Licata (Prov. Agrigento)*, Quaderno di Agronomia n. 5, Istituto di Agronomia Generale e Coltivazioni Erbacee, Università degli Studi di Palermo, Industria Grafica Nazionale, Palermo, 1968.
- BALLATORE G.P., BARCELLONA C., CAPPADONA C., FIEROTTI G., *Studi sui terreni siciliani*, Nota III, Studio pedo-agronomico della vallata del salso inferiore (Piana di Licata), Ed. IGN, Palermo, 1968.
- BALLATORE G.P., FIEROTTI G., LOMBARDO V., *L'impiego di acque salmastre in agricoltura*, Nota II, Esperienze di irrigazione di suoli argillosi con acque a bassa salinità, Quaderni di Agronomia N.5, Palermo, 1968.
- BALLATORE G.P., FIEROTTI G., LOMBARDO V., SARNO R., *L'impiego di acque salmastre in agricoltura*, Nota I, Esperienze di irrigazione di suoli argillosi con acque salmastre, Quaderni di Agronomia N.5, Palermo, 1968.
- BALLING R.C., IDSO S.B., *Historical temperature trends in the United States and the effect of urban population growth*, Journal of Geophysical Research, vol. 94, 1989.
- BALTSAVIAS E.P., *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*, Journal of Photogramm. Remote Sens., 54, 1999.
- BARBERA G., LA MANTIA T., LA MELA VECA D.S., MARCHETTI M., SCALZO G., *Productivity of Eucalyptus spp. in different environmental condition and silvicultural systems in Sicily - An updating description*, in "Atti dell'International Conference Eucalyptus in the Mediterranean Basin: Perspectives and new Utilisations, Taormina e Crotone, 2000", a cura di F. Cannata. (Firenze), CNR - IUFRO, 2001.
- BARENBLATT G.I., *Similarity, self-similarity and intermediate asymptotics*, Consultant Bureau, New York, 1979.
- BARENBLATT G.I., *Dimensional analysis*, Gordon & Breach, Amsterdam, The Netherlands, 1987.
- BARONE E., LA MANTIA T., *La coltivazione del noce e del ciliegio da legno in alcune regioni dell'Italia centrale e meridionale: Sicilia* in "L'arboricoltura da legno:

- un'attività produttiva al servizio dell'ambiente", "Libro bianco sulle produzioni legnose fuori foresta in Italia" a cura di Minotta G., Edizioni Avenue media, Bologna, 2003.
- BAZZANI G.M., GRILLENZONI M., *Politica agro-ambientale e riflessi sul settore primario: normativa CEE e riferimento nazionale* in "Politiche Ambientali ed Agricoltura", a cura di G. Franceschetti, UNIPRESS, Padova., 1995.
- BAZZOFFI P., *Fagna-type hydrological unit for runoff measurement and sampling in experimental plot trials*, Soil Technology, 6, 1993.
- BELLIN N., WESEMAEL VAN B., MEERKERK A.L., GONZALEZ BARBERA G., *Changes in field patterns increase the risk of hydrological connectivity: a case study for the period 1956-2006 in a catchment of Murcia region, Spain*, 2007.
- BELLINI, G., *Il rischio di desertificazione nei terreni agricoli di una parte del bacino dell'Imera meridionale. Territorio del comune di Licata. Possibili interventi*, in Progetto RIADE, 2004.
- BERNETTI G., *Selvicoltura speciale*, Ed. UTET, Torino, 1995.
- BISHOP G.D., CHURCH M.R., *Automated Approaches for Regional Runoff Mapping in the Northeastern United States*, Journal of Hydrology, n.138, 1992.
- BISHOP G.D., CHURCH M.R., *Mapping Long-Term Regional Runoff in the Eastern United States Using Automated Approaches*, Journal of Hydrology, n.169, 1995.
- BIANCHI M., CANTIANI P., FERRETTI F., *Sistema informativo per l'asestamento forestale*, 2002.
- BLOOMFIELD P., *Trends in global temperature*, Climate change, vol. 21, 1992.
- BONACCORSO B., CANCELLIERE A., ROSSI G., *Detecting trends of extreme rainfall series in Sicily*, Advances in Geosciences, n. 2, 2005.
- BONO E., *Tecniche di interpolazione spaziale finalizzate alla ricostruzione delle serie storiche di dati climatici*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2005.
- BONO E., LA LOGGIA G., NOTO L.V., *Spatial interpolation methods based on the use of elevation data*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 2005.
- BORRELLI G., FERRARA V., GIORDANO L., IANNETTA M., SCIORTINO M., *Criticità ambientali: la desertificazione*, in Rapporto Italia 2004, Erispes, 2004.
- BORRELLI, G., GIORDANO L., IANNETTA M., SCIORTINO M., *Report from Italy. The identification of sensitive areas in Italy*, in MEDRAP Report, Ghazi A. e Enne G. (eds), Sassari, 2004.
- BORROUGH P.A., *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Claredon Press, Oxford, 1996.
- BOVE B., BRINDISI P., GLISCI C., PACIFICO G., SUMMA M.L., *Indicatori climatici di desertificazione in Basilicata*, Forest@ 2(1), 2005.
- BOVO V., GAETAN C., VILLI V., *Massimi annuali delle piogge giornaliere del Triveneto. Un'analisi statistica per la verifica della presenza di trend*, L'acqua, n.5, 2003.



- BRADFORD J.M., HUANG C., *Comparison of interrill soil loss for laboratory and field procedures*, Soil Technology, 6, 1993.
- BRADLEY R.S., DIAZ H.F., EISCHEID J.K., JONES P.D., KELLY P.M., GOODNESS C.M., *Precipitation fluctuations over northern hemisphere land areas since the mid-19th century*, Science, 1987.
- BRAKENSIEK D.O., OSBORN H.B., RAWLS W.J., *Field manual for research in agricultural hydrology*, Agriculture Handbook n.224, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 1979.
- BROWNING G.M., NORTON R.A., MCCALL A.G., BELL F.G., *Investigations in erosion control and the reclamation of eroded land at the Missouri Valley Loess Conservation Experiment Station Clarinda. IA. 1932-42. USDA Tech. Bull. 959*, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1948.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., *Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995*, Theor. Appl. Climatol., 2000.
- BRUNETTI M., BUFFONI L., MANGIANTI F., MAUGERI M., NANNI T., *Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy*, Global and Planetary Change, vol. 40, 2004.
- BRUNO C., FERRO V., *Valutazione dell'indice mensile di aggressività delle piogge in Sicilia*, Atti del Convegno AIIA 2005 "L'Ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania 27-30 giugno 2005, memoria 1004.
- BRUNO C., FERRO V., *Indagine sperimentale di pieno campo sulla formazione dei rill*, Rivista di Ingegneria Agraria, 4, 2006.
- BRYAN R.B., POESEN J., *Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development*, Earth Surface Processes and Landforms, 14, 1989.
- BUDYKO M.I., *The heat balance of hearth's surface*. Gidromet. Izdatelsob, Leningrad, 1958.
- BUFFONI L., MAUGERI M., NANNI T., *Precipitation in Italy from 1833 to 1996*, Theor. Appl. Climatol., 1999.
- BURN D.H., HAG ELNUR M.A., *Detection of hydrologic trends and variability*, Journal of Hydrology, n.255, 2002.
- CACCIAMANI C., LAZZERI M., SELVINI A., TOMOZEIU R., ZUCCHERELLI A., *Evidenza di cambiamenti climatici sul Nord Italia. Parte 1: Analisi delle temperature e delle precipitazioni*, Quaderno tecnico Arpa-SMR, n°04/20, 2001.
- CANNAROZZO M., *Analisi statistica delle precipitazioni registrate in Sicilia finalizzata allo studio dei cambiamenti climatici*, Sviluppo agricolo 3-4, 1995.
- CANNAROZZO M., LIUZZO L., NOTO L.V., VIOLA F., *Distribuzione spaziale dei trend pluviometrici in Sicilia (1921-2000)*, Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzione Idraulica, Roma, 2006.

- CANTIANI M., *I cedui di eucalitto della Sicilia centrale*, L'Italia Forestale e Montana 2, 1976.
- CAPOCECERA P., COLONNA N., *La salinizzazione*, in Progetto RIADE (www.riade.net), a cura del Gruppo Lotta alla Desertificazione, Unità Biotecnologie, Protezione della Salute e degli Ecosistemi, ENEA CRCasaccia, 2005.
- CAPRA A., FERRO V., SCICOLONE B., *Erosione da ephemeral gully in un piccolo bacino siciliano*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- CAPRA A., SCICOLONE B., *Osservazione sulla formazione di un ephemeral gully*, Atti del Convegno Nazionale AIIA, Vieste, Italy, 2001.
- CAPRA A., SCICOLONE B., *Ephemeral gully erosion in a wheat-cultivated area in Sicily (Italy)*, Biosystems Engineering, 83, 2002.
- CARNEMOLLA S., DRAGO A., PERCIABOSCO M., SPINNATO F., *Metodologia per la redazione di una carta in scala 1:250000 sulle aree vulnerabili al rischio di desertificazione in Sicilia*, Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, Palermo, 2002.
- CARTER C.E., PARSONS D.A., *Field test on the Coshocton-type wheel runoff sampler*, Transactions of the ASAE, 10, 1967.
- CASCIO A., *Tavola alsometrica del pino domestico del "bosco Bellia" cresciuto in fustaia coetanea*, L'Italia Forestale e Montana XXIV, 1969.
- CAVARETTA D., SAPORITO L., *Boschi artificiali della Sicilia. Aspetti selvicolturali e problematiche gestionali*, in "Atti del secondo congresso di selvicoltura: conservazione e miglioramento dei boschi in Sicilia", Regione Siciliana, Azienda Foreste Demaniali, Palermo 1998.
- CHAPLOT V., LE BISSONNAIS Y., *Field measurement of interrill erosion under different slopes and plot sizes*, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 2000.
- CHARLTON M.E., LARGE A.R.G., FULLER I. C., *Application of airborne LIDAR in river environments: The River Coquet, Northumberland, UK*, Earth, Surface Processes and Landforms, 28(3), 2003.
- CHEN Y., TANG H., *Desertification in north China: background, antropogenic impact and failure in combating it*, Land. Degrad. Develop. 16, 2005.
- CHHABRA R., *Soil Salinity and Water Quality*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1996.
- CIANCIO O., HERMANIN L., *Gli eucalitteti della Calabria. Tavole alsometriche dell'"Eucalyptus occidentalis" e dell' "E. x trabutii"*, Annali dell'Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, Volume 7, 1976.
- CIANCIO O., LA MARCA O., MERCURIO R., SANESI G., *Le problematiche dell'arboricoltura da legno di qualità e quantità*, Cellulosa e Carta 3, 1992.

- CIANCIO O., MERCURIO R., NOCENTINI S., *Le specie forestali esotiche nella selvicoltura italiana*, Annali dell'Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, vol. XII-XIII, 1981-82.
- CIANCIO O., *Criteri di gestione sostenibile dei sistemi forestali nelle aree protette. Relazione preliminare*, Ministero dell'Ambiente, Servizio Conservazione della Natura, Accademia Italiana di Scienze Forestali, 1998.
- CIANCIO O., *Rimboschimenti e piantagioni in Italia*, Atti del 12° Seminario IAED, 2002.
- CIULLA S., *I processi di rinaturalizzazione degli eucalitteti della Sicilia meridionale*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- COLES S., HEFFERNAN J., TAWN J., *Dependence measures for extreme value analyses*, Extremes, 1999.
- COLLETTI L., *Risultati dell'applicazione del Reg. CEE 2080/92 in Italia*, Sherwood 70, 2001.
- CORONA P., *Study outline on ecological methods of afforestation*, in "Ecology and agroecosystems" Bunce R.G.H., Ryszkowski L., Paoletti M.G. (Eds.), Lewis Publishers, 1993
- CORONA P., *L'aspetto paesaggistico dei rimboschimenti*, Sicilia Foreste, n.35/36, 2003
- CORONA P., FACCIOOTTO G., LUCCI S., MARIANO A., *Contributo alla conoscenza delle tecniche colturali in piantagioni da legno*. Quaderni di ricerca SAF 33, 1992.
- CORONA P.M., MARCHETTI M., *Impianti forestali e gestione sostenibile*, in Rimboschimenti e piantagioni nelle trasformazioni del paesaggio, IAED Quaderno 15, Edizioni Papageno, 2002.
- CORONA P., PETTENELLA D., *Aspetti tecnici ed economici delle recenti iniziative di arboricoltura da legno*, Monti e Boschi 1988.
- CULLOTTA S., PIZZURRO G.M., GARFÌ G., LA MANTIA T., *Analisi dei processi di rinaturalizzazione nelle pinete artificiali mediterranee dei monti di Palermo (Sicilia Nord-occidentale)*, S.I.S.E.F. Atti III°, 2003.
- DAZZI C., *Salinità e Qualità del Suolo*, Atti del Convegno del Cinquantenario SISS "L'emergenza suolo", Boll. SISS Vol. 51, N° 1-2, 2002.
- DAZZI C., *Acque saline e qualità del suolo*, Italian Journal of Agronomy, Supplement Issue, Vol. 1, N.3. ISSN: 1125-4718, 2006.
- DAZZI C. et al., *Suoli e salinità naturale e indotta. Il Progetto POM-OTRIS in Sicilia*, CD-ROM, Progress Eds, Alcamo, 2002.
- DAZZI C. et al., *La salinizzazione del suolo. Libro bianco sullo stato del suolo in Italia*, (<http://www.apat.gov.it/>), 2005.
- DAZZI C., FIEROTTI G., *Problems and management of salt-affected soils in Sicily. Soil salinization and alkalization in Europe*, Ediz. Misopolines European Society for Soil Conservation, 1994.
- DE JONG E., BEGG C.B.M., KACHANOSKI R.G., *Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils*, Canadian Journal of Soil Science, 63, 1983.

- DE JONG E., VILLAR H., BETTANY J.R., *Preliminary investigations on the use of  $^{137}\text{Cs}$  to estimate erosion in Saskatchewan*, Canadian Journal of Soil Science, 62, 1982.
- DE LUIS M., RAVENTÒS J., GONZÁLES-HIDALGO J.C., SÁNCHEZ J.R., CORTINA J., *Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain)*, International Journal of Climatology, n. 20, 2000.
- DE LUIS M., RAVENTÒS J., GONZÁLES-HIDALGO J.C., SÁNCHEZ J.R., CORTINA J., GARCÍA-CANO M.F., *Analysis of maximum daily probability precipitation for different returns period: comparison among three different methods on Mediterranean conditions*, in Proceedings of the 15th International Sedimentological Congress, Universidad de Alicante, Spain, 1998.
- DE MARTONNE E., *L'indice d'aridité*, Bull. Ass. Geogr. de France, Vol. IX, 1926.
- DE PHILIPPIS A., *Sulla tecnica di preparazione del suolo per il rimboschimento in clima caldo-arido*, Pubbl. R. Staz. Sperim. Selvic., 1939.
- DICA - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE, Università degli Studi di Catania, *Piano di Azione Locale sulla lotta contro la desertificazione in Sicilia. Area di studio: bacino Imera meridionale*, Convenzione DICA-UNICAL, Catania, 2007.
- DI FORTI N., *Analisi della produttività delle piantagioni di eucalipto in Sicilia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- DI IAA - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA ED APPLICAZIONI AMBIENTALI, Università degli Studi di Palermo, *Esecuzione di ricerche applicative atte a consentire la definizione di Piani di Azione Locali*, Convenzione DI IAA-UNICAL, Palermo, 2007.
- DI STEFANO C., *La tecnica del cesio-137 per la stima della produzione di sedimenti nel bacino SPA2*, Atti del Convegno AIIA 2005 "L'Ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania 27-30 giugno 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., *Linking clay enrichment and sediment delivery processes*, Byosystems Engineering, 81, 4, 2002.
- DI STEFANO C., FERRO V., *Monitoraggio dei processi erosivi e calibrazione di un modello distribuito in un piccolo bacino siciliano*, Rivista di Ingegneria Agraria, 2, 2002.
- DI STEFANO C., FERRO V., *Criteri di zonizzazione climatica nello studio dei processi di desertificazione in Sicilia*, Rivista di Ingegneria Agraria, 2, 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., *Evaluation of SEDD model for predicting sediment yield at SPA2 experimental basin*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol.32, 2007.
- DI STEFANO C., FERRO V., *Valutazione della qualità del clima e del suolo nella identificazione delle aree sensibili alla desertificazione in Sicilia*, Quaderni di Idronomia Montana, 27, 2007.

- DI STEFANO C., FERRO V., GERACI L., *Monitoraggio degli eventi erosivi e calibrazione del modello SEDD nel bacino sperimentale SPA1 in Sicilia*, L'Acqua, 1, 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., GERACI L., GIORDANO G., *Una nuova stazione sperimentale per il monitoraggio della produzione di sedimenti nell'area sperimentale di Sparacia*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., GIORDANO G., *Misure di produzione di sedimenti nel bacino sperimentale Sparacia*, Atti del VIII Convegno Nazionale di Ingegneria Agraria "Ingegneria agraria per lo sviluppo dei paesi mediterranei", Vieste, 2001.
- DI STEFANO C., FERRO V., GIORDANO G., *Monitoraggio della produzione di sedimenti nell'area sperimentale di Sparacia*, Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Vol.V, 2002.
- DI STEFANO C., FERRO V., GIORDANO G., *Stima della produzione di sedimenti in due bacini sperimentali di differente estensione*, Atti del Convegno AIIA 2005 "L'Ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania 27-30 giugno 2005, memoria 6011.
- DI STEFANO C., FERRO V., MINACAPILLI M., *Testing SEDD model for Sicilian large basino*, IAHS Symposium "Sediment Budgets", 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., MINACAPILLI M., *Verifica del modello SEDD per bacini siciliani di grande estensione*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., PAMPALONE V., *Modellazione della produzione di sedimenti nel bacino sperimentale SPA2 in Sicilia*, Rivista di Ingegneria Agraria, 3, 2006.
- DI STEFANO C., FERRO V., PORTO P., *Linking sediment yield and caesium-137 spatial distribution at basin scale*, Journal of Agricultural Engineering Research, 74, 1999.
- DI STEFANO C., FERRO V., PORTO P., *Modelling sediment delivery processes by a stream tube approach*, Journal of Hydrological Sciences, 44(5), 1999.
- DI STEFANO C., FERRO V., PORTO P., *Length slope factors for applying the Revised Universal Soil Loss Equation at basin scale in Southern Italy*, Journal of Agricultural Engineering Research, 75, 2000.
- DI STEFANO C., FERRO V., PORTO P., RIZZO S., *Testing a spatially distributed sediment delivery model (SEDD) in a forested basin by cesium-137 technique*, Journal of Soil and Water Conservation, Vol.60, 3, 2005.
- DI STEFANO C., FERRO V., PORTO P., TUSA G., *Slope curvature influence on soil erosion and deposition processes*, Water Resources Research, 36, 2000.

- DI STEFANO C., RIZZO S., *Impiego della tecnica del cesio-137 per il monitoraggio dei processi erosivi nel bacino sperimentale SPA2*, Quaderni di Idronomia Montana, 24, 2005.
- DOUGLAS E.M., VOGEL R.M., KROLL C.N., Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation, *Journal of Hydrology*, n. 240, 2000.
- DRAGO A., *Atlante climatologico della Sicilia*, Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano, Assessorato Agricoltura e Foreste, Regione Siciliana, 2002.
- DREGNE H.E., *Combating desertification: Evaluation of progress*, Environm Conserv, 1984.
- DROGUE G., PFISTER L., LEVIANDIER T., EL IDRISSE A., IFFLY J.F., MATGEN P., HUMBERT J., HOFFMANN L., *Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin*, *Journal of Hydrology*, n.293, 2004.
- EASTERLING D.R., HORTON B., JONES P.D., PETERSON T.C., KARL T.C., PARKER D.E., SALINGER M.J., RAZUVAYEV V., PLUMMER N., JAMASON P., FOLLAND C.K., (1997), *Maximum and minimum temperature trends for the globe*, *Science*, vol. 277, n.5324, 1997.
- EASTERLING D.R., MEEHL G.A., PERMESAN C., CHANGNON S.A., KARL T.R., MEARNES L.O., *Climate extremes: observations, modeling, and impacts*, *Science*, n.289, 2000.
- ECCHER A., PETTENELLA D., *Nuove prospettive dall'arboricoltura da legno in aree agricole marginali*, Monti e Boschi n.1, 1990.
- EFRON B., TIBSHIRANI R.J., *An introduction to the bootstrap*, Chapman and Hall, International Thomson Publication, New York, USA, 1993.
- Emberger L., *Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux*, Fac. Sc de l'Univ. de Montpellier, Fasc. 7, 1955.
- EUROPEAN COMMISSION, *The MEDALUS project, MEditerranean DEsertification And Land Use: Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification*, Kosmas C., Kirkby M., Geeson N. (eds.), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1999.
- FASCETTA D., *Analisi dendro-auxometriche sui popolamenti artificiali di pino d'Aleppo (Pinus halepensis Mill) di contrada Calogno (EN)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 1998.
- FERRO V., *Applying hypothesis of self-similarity for flow-resistance law of small diameter plastic pipes*, *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 123, 1997.
- FERRO V., *Further remarks on a distributed approach to sediment delivery*, *Journal of Hydrological Sciences*, 42(5), 1997.

- FERRO V., Modellistica matematica e verifica sperimentale dell'approccio distribuito dei processi di sediment delivery, Quaderni di Idronomia Montana, 19/1, 1999.
- FERRO V., *Problematiche inerenti la modellazione e la misura dell'erosione e della produzione di sedimenti*, Seminario su Monitoraggio e Modellazione dei Processi Idrologici, Palermo, 1999.
- FERRO V., Problematiche inerenti la modellazione e la misura dell'erosione e della produzione di sedimenti, Seminario "Monitoraggio e modellazione dei processi idrologici", Palermo, 1999.
- FERRO V., *Theoretical end-depth-discharge relationship for free overfall*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 125, 1999.
- FERRO V., *Processi Erosivi*, Atti del seminario AIIA "Monitoraggio dei Processi Idrometeorologici", Padova, Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 2001.
- FERRO V., *Processi Erosivi*, Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 2003.
- FERRO V., *La sistemazione dei bacini idrografici - II edizione*, McGraw-Hill, Milano, 2006.
- FERRO V., BAGARELLO V., DI STEFANO C., GIORDANO G., PORTO P., *Monitoring and predicting sediment yield in a small sicilian basin*, Transactions of the ASAE, Vol. 44, 3, 2001.
- FERRO V., DI STEFANO C., GIORDANO G., RIZZO S., *Sediment delivery processes and the spatial distribution of caesium-137 in a small sicilian basin*, Hydrological Processes, 12, 1998.
- FERRO V., GIORDANO G., *Monitoraggio dei processi erosivi nel bacino sperimentale Sparacia*, Atti del seminario AIIA "Monitoraggio dei Processi Idrometeorologici", Padova, Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 2001.
- FERRO V., MINACAPILLI M., *Sediment delivery processes at basin scale*, Journal of Hydrological Sciences, 40(6), 1995.
- FERRO V., PORTO P., *A sediment delivery distributed (SEDD) model*, Journal of Hydrological Engineering, ASCE, Vol.5, 4, 2000.
- FERRO V., PORTO P., TUSA G., *Testing a distributed approach for modelling sediment delivery*, Journal of Hydrological Sciences, Vol.43, 3, 1998.
- FIEROTTI G., *I suoli della Sicilia con elementi di genesi, classificazione, cartografia e valutazione dei suoli*, Palermo, 1997.
- FIEROTTI G., *I suoli di fronte all'irrigazione con acque anomale*, in Atti del Convegno "Un programma di valorizzazione territoriale per il meridione d'Italia", Lagopesole (Potenza), 15-16 luglio 1997, Boll. Soc. It. Scienza del Suolo, n.48 (1), 1999.

- FIEROTTI G., DAZZI C., TUSA D., *Riflessi dell'irrigazione con acque saline sulla qualità dei suoli*, Atti del Convegno "Le acque salmastre come risorsa idrica: limiti e prospettive", Foggia, maggio 1999.
- FIEROTTI G., LOMBARDO V., FOTO F., *L'impiego di acque salmastre in agricoltura*, Nota III, Esperienze di irrigazione di suoli argillosi con acque a moderata salinità, Quaderni di Agronomia N.5, Palermo, 1968.
- FIEROTTI G., SARNO R., BARCELLONA C., *L'impiego di acque salmastre in agricoltura*, Nota IV, L'azione di sostanze ammendanti e correttive sull'evoluzione del complesso assorbente e dei sali solubili in suoli argillosi, Quaderni di Agronomia N.5, Palermo, 1968.
- FILSON G.C., *Agroforestry extension and the western China development strategy*, 2001.
- FOLLAND C.K., MILLER C., BADER D., CROWE M., JONES P., PLUMMER N., RISHMAN M., PARKER D.E., ROGERS J., SCHOLEFIELD P., *Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes*, Asheville, NC, USA, 3 – 6 June 1997, Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extremes, Climatic Change, 1999.
- FOSTER G.R., HUGGINS L.F., MEYER L.D., *Laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships*, Transactions of the ASAE, 27, 1984.
- FOSTER G.R., HUGGINS L.F., MEYER L.D., *Laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships*, Transactions of the ASAE, 27, 1984.
- FOSTER G.R., OSTERKAMP W.R., LANE L.J., HUNT D.W., *An erosion equation derived from basic erosion principles*, Transactions of the ASAE, 19, 1982.
- FREGA F., PIRO P., CARBONE M., *Identificazione di aree sensibili alla desertificazione (Esas). Applicazione alla regione Calabria*, L'Acqua, Vol. 2, 2007.
- GARFÌ G., LA MELA VECA D.S., SAPORITO L., *Analisi degli accrescimenti di Pinus brutia Ten. e Pinus halepensis Mill. in popolamenti artificiali sui monti Sicani (AG)*, Atti del Secondo Congresso Nazionale di Selvicoltura, Venezia 24-27 giugno 1998, Vol. IV.
- GEMIGNANI G., *Ipotesi di intervento negli eucalitteti della azienda SICILFOR-SIACE*, Quaderni forestali n. 2, 1981.
- GENDUSA F., *I contratti di impresa forestale con particolare riguardo alla realizzazione del progetto speciale n. 24 nella Regione Sicilia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 1983.
- GENOVEZ A., ABT S., FLORENTIN B., GARTON A., *Correction for settlement of Parshall flume*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 119, 1993.
- GIACOBBE A., *Il rimboschimento dei terreni argillosi*, Atti del Congresso Nazionale sui rimboschimenti e sulla ricostituzione dei boschi degradati, Firenze 12-15 aprile 1961, Vol. I.
- GIACOBBE A., *I rimboschimenti in Sicilia*, Monti e Boschi, 1963.
- GIAMI G., *Boschi naturali della Sicilia. Aspetti selvicolturali e problematiche gestionali*, Atti del II Congresso Nazionale di Selvicoltura, Giornata preparatoria, Palermo 2 marzo 1988.



- GILLEY J.E., KOTTWITZ E.R., SIMANTON J.R., *Hydraulic characteristics of rills*, Transactions of the ASAE, 33, 1990.
- GIORDANI C., ZANCHI C., *Elementi di conservazione del suolo*, Patron Editore, Bologna, 1995.
- GIORDANO G., FERRO V., BAGARELLO V., DI STEFANO C., IOVINO M., MINACAPILLI M. (2005). *La carta dell'erosione potenziale del territorio siciliano*, Atti del Convegno AIIA "L'Ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania, 27-30 giugno 2005, Memoria 1001.
- GLEICK P.H., Basic water requirements for human activities: meeting basic needs, Water International, n.21, 1996.
- GOVERS G., *Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion*, Catena, 12, 1985.
- Govers G. (1992). *Relationships between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non layered materials*. Earth Surface Processes and Landforms, 17, 515-528
- GRAHAM N.E., *Simulation of recent global temperature trends*, Science, vol. 267, n.5198, 1995.
- GROISMAN P.Y., LEGATES D.R., *Documenting and detecting long-term precipitation trends: where we are and what should be done*, Climate Change, n.31, 1995.
- GROSH J.L., JARRETT A.R., *Interrill erosion and runoff on very steep slopes*, Transactions of the ASAE, 37, 1994.
- GUO S., WANG J., XIONG L., YING A., LI D., *A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts*, China. Journal of Hydrology, n.268, 2002.
- HAMMOND A., MATTHEWS E., *Critical consumption trends and implications. Degrading Earth's ecosystems* Washington DC, World Resources Institute, 1999.
- HANSEN J., RUEDY R., SATO M., REYNOLDS R., *Global surface air temperature in 1995. Return to pre-Pinatubo level*. Geophys. Res. Lett., n. 23, 1996.
- HARGREAVES G.H., SAMAN Z.A., *Estimating potential evapotranspiration*, Tech. Note, J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 108(3), 1082, 225-230.
- HARGREAVES G.H., SAMANI Z.A., (1985), *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Applied Engrg. in Agric., 1985, 1(2).
- HILLEL D., *Environmental soil physics*, Academic Press, New York, 1998.
- HIRSCH R.M., SLACK J.R., SMITH R.A., *Techniques of trend analysis for monthly water quality data*, Water Resources Research, n.18, 1982.
- HOSKING J. R., WALLIS M., *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1997.

- HOUGHTON J.T., MEIRA FILHO L.G., CALLANDER B.A., HARRIS N., KATTENBERG A., MASKELL K., *Climate Change. The IPCC Second Assessment Report*, Cambridge University Press, New York, 1996.
- HULME M., *Recent climatic change in the world's drylands*, Geophysical research letters, vol. 23, 1996.
- HUNT B.G., *Natural climatic variability as an explanation for historical climatic fluctuations*, Climatic Change, n. 38, 1998.
- HUNTINGTON T.G., *Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis*, Journal of Hydrology, n. 319, 2006.
- IPCC, IN CLIMATE CHANGE, *The Science of Climate Change*, Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- IPCC, CLIMATE CHANGE, *The Physical Science Basis Working Group I. Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Edited by Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt, K., Tignor M.M.B., Miller H.L., Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- JENSEN M.E., *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph MI, 1980.
- JOEL A., MESSING I., SEGUEL O., CASANOVA M., *Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes*, Hydrological Processes, 16, 2002.
- KARL T.R., JONES P.D., KNIGHT R.W., KUKLA G., PLUMMER N., RAZUVAYEV V., GALLO K.P., LINDSEAY J., CHARLSON R.J., PETERSON T.C., *A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature*, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 74, 1993.
- KARL T.R., KNIGHT R.W., PLUMMER N., *Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century*, Nature, n. 377, 1995.
- KENDALL M.G., *Rank correlation methods*, 3rd ed, Hafner Publishing Company, New York, 1962.
- KENDALL M.G., GIBBONS J.D., *Rank Correlation Methods*, 5th ed., edited by E. Arnold, London, U.K., 1981.
- KHAN A.A.H., ONG C.K., *Design and calibration of tipping bucket system for field runoff and sediment quantification*, Journal of Soil and Water Conservation, 52, 1997.
- KINNELL P.I.A., *Runoff as a factor influencing experimentally determined interrill erodibilities*, Australian Journal of Soil Research, 31, 1993.
- KINZEL P.J., WAYNE WRIGHT C., NELSON J.M., BURMAN A.R., *Evaluation of an experimental LIDAR for Surveying a shallow, braided, sand-bedded river*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133 (7), 2007.
- KLEIN TANK A.M.G., WIJNGAARD J.B., KÖNNEN G.P., BÖHM R., DEMARÉE G., GOCHEVA A., MILETA M., PASHIARDIS S., HEJRLIK L., KERN-HANSEN C., HEINO R., BESSEMOULIN P., MÜLLER-WESTERMEIER G., TZANAKOU M., SZALAI S.,

- PÁLSDÓTTIR T., FITZGERALD D., RUBIN S., CAPALDO M., MAUGERI M., LEITASS A., BUKANTIS A., ABERFELD R., VAN ENGELN A.F.V., FORLAND E., MIETUS M., COELHO F., MARES C., RAZUVAEV V., NIEPLOVA E., CEGNAR T., ANTONIO LÓPEZ J., DAHLSTRÖM B., MOBERG A., KIRCHHOFFER W., CEYLAN A., PACHALIUK O., ALEXANDER L.V., PETROVIC P., *Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment*, Int. J. Climatol., n.22, 2002.
- KLIK A., SOKOL W., STEINDL F., *Automated erosion wheel: a new measuring device for field erosion plots*, Journal of Soil and Water Conservation, 59, 2004.
- KOSMAS C., FERRARA A., BRIASOULI H., IMESON A., *Methodology for mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification*, in "The Medalus project Mediterranean desertification and land use", Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification, Edited by Kosmas C., Kirkby M., Geeson N., European Union, 1999.
- KOSTER R.D., SUAREZ M.J., *A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes*, J. Clim., n.12 (7), 1999.
- KOTHYARI U.C., SINGH V.P., *Rainfall and temperature trends in India*, Hydrological Processes, vol. 10, 1996.
- KUNKEL K.E., PIELKER JR R.A., CHANGNON S.A., Temporal fluctuation in winter and climate extremes that cause economic and human health impact: a review, International Journal of Climatology, n.19, 1999.
- LAL R., STEWART B.A., *Soil processes and water quality*, Advances in Soil Science, Lewis Publishers, 1994.
- LA MANTIA T., *L'arboricoltura da legno nel paesaggio siciliano*. Quaderni IAED, n.15, 2002.
- LA MANTIA T., BARBERA G., 2003 - *Evoluzione del settore agroforestale e cambiamenti del paesaggio in Sicilia*, in Lo Piccolo F., Schilleci F. (a cura di), *A Sud di Broddingnag. L'identità dei luoghi: per uno sviluppo locale autosostenibile nella Sicilia occidentale*, Franco Angeli, Roma, 2003.
- LA MANTIA T., COLUMBA P., SCALZO G., *Risultati dell'applicazione del Regolamento 2080/92 in Sicilia*, Atti della Tavola Rotonda "Selvicoltura ed Arboricoltura da legno: quale gestione?", Palermo 25 marzo 1999, Collana Sicilia Foreste, 7:53-61, Regione Siciliana, Assessorato Agricoltura e Foreste, Direzione Azienda Foreste Demaniali, 2000.
- LA MANTIA T., LA MELA VECA D.S., MARCHETTI M., BARBERA G., *Risultati preliminari sull'analisi delle tecniche di rimboschimento nella Sicilia Meridionale*, L'Italia Forestale e Montana, 3: 262-275, 2002.
- LA MANTIA T., MARCHETTI M., CULLOTTA S., PASTA S., *Materiali conoscitivi per una classificazione dei tipi forestali e preforestali della Sicilia*, L'Italia Forestale e Montana, 2000.
- LA MANTIA T., PASTA S., *La rinaturalizzazione dei rimboschimenti: proposte metodologiche e ipotesi di intervento nella Riserva Naturale "Grotta di Santa Ninfa"*, Naturalista Siciliano, S. IV, XXV (Suppl.), 2001.

- LA MELA VECA D.S., *Risultati preliminari sul rapporto tra suolo e vegetazione forestale. Il caso dei rimboschimenti di Pinus pinea L. nei Monti Sicani (Sicilia occidentale)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 1995.
- LA MELA VECA D.S., SAPORITO L., *La gestione dei rimboschimenti in Sicilia: produzione legnosa e prospettive di rinaturalizzazione*, Atti della Tavola Rotonda "Selvicoltura ed Arboricoltura da legno: quale gestione?", Palermo 25 Marzo 1999, Collana Sicilia Foreste, 7:53-61, Regione Siciliana, Assessorato Agricoltura e Foreste, Direzione Azienda Foreste Demaniali, 2000.
- LANG R., Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Hinsicht, Internat. Mitt, fur Bodenkunde, 5, 1915.
- LANG R.D., *Accuracy of two sampling methods used to estimate sediment concentration in runoff from soil-loss plots*, Earth Surface Processes and Landforms, 17, 1992.
- LATTANZI A.R., MEYER L.D., BAUMGARDNER M.F., *Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion*, Soil Science Society of America Proceedings, 38, 1974.
- LAZZARA D., *Le principali specie per l'arboricoltura da legno in ambiente mediterraneo e prospettive per la Sicilia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 1999.
- LETTENMAIER D.P., WOOD E.F., WALLIS J.R., *Hydro-climatological trends in the continental United States*, Journal of Climatology, n.7, 1994.
- LIEBSCHER H., *Results of research on some experimental basins in the upper Harz Mountains (Federal Republic of Germany)*, Symposium of Wellington, Results of research on Representative and Experimental Basins, IASH Pub. n 97, 1972.
- LINE D.E., MEYER L.D., *Flow velocities of concentrated runoff along cropland furrows*, Transactions of the ASAE, Vol. 31, 1988.
- LIVEZEY R.E., CHEN W.Y., *Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques*, Monthly Weather Review 111, 1983.
- LO GUERCIO C., (1999), *Il ruolo dell'Italia nella lotta alla desertificazione*, CUEN, Ministero dell'Ambiente, Protocollo d'intesa del 16 giugno 1998 tra il Ministero dell'Ambiente e la FAO relativo alla lotta sulla desertificazione, Gazzetta Ufficiale n. 287 del 09/12/1998.
- LUCCI S., *Conservazione del suolo e meccanizzazione nelle attività del rimboschimento*, SAF, 1993.
- MAETZKE F., CULLOTTA S., LA MELA VECA D.S., LA MANTIA T., PIZZURRO G. (in stampa), *Individuazione di aree ecologicamente omogenee e di un sistema di aree a priorità di intervento per la pianificazione forestale in Sicilia*, FOREST@.
- MAHERAS P., KOLYVA-MACHERA F., *Temporal and spatial characteristics of annual precipitation over the Balkans in the twentieth century*, International Journal of Climatology, n.10, 1990.

- MANCINO L., CLAPS P., *Impiego di classificazioni climatiche quantitative nell'analisi regionale del deflusso annuo*, Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche, Potenza, 16-19 settembre 2002.
- MANN H.B., *Non parametric tests again trend*, *Econometria*, n.13, 1945.
- MANTON M.J., DELLA-MARTA P.M., HAYLOCK M.R., HENNESSY K.J., NICHOLLS N., CHAMBERS L.E., COLLINS D.A., DAW G., FINET A., GUNAWAN D., INAPE K., ISOBE H., KESTIN T.S., LEFALE P., LEYU C.H., LWIN T., MAITREPIERRE L., OUPRASITWONG N., PAGE C.M., PAHALAD J., PLUMMER N., SALINGER M.J., SUPPIAH R., TRAN V.L., TREWIN B., TIBIG I., YEE D., *Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998*, *International Journal of Climatology*, vol. 21, 2001.
- MARINELLI A., ROMANO D., *La strategia della CEE e dell'Italia nel settore forestale*, La questione Agraria, 1990.
- MARKS K., BATES P., *Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models*, *Hydrological Processes*, 14, 2000.
- MARRANCA S., *I risultati dei programmi di imboscamento sovvenzionati dall'amministrazione pubblica*, Atti del Convegno "La selvicoltura da legno strumento di rilancio del territorio e dell'economia montana", Borgetto (Pa), 20 aprile 2004.
- MAUGERI M., NANNI T., *Surface air temperature variation in Italy: recent trends and an update to 1993*, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 61, 1998.
- MCCLURE B.C., *Policies related to combating desertification in the United States of America*, *Land. Degrad. Develop.*, n.9, 1998.
- MCCOOL D.K., FOSTER G.R., MUTCHLER C.K., MEYER L.D., *Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation*, *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1989.
- MCHENRY J.R., RITCHIE J.C. (1977). *Estimating field erosion losses from fallout Cesium-137 measurements*, IAHS-AISH Publ. 122, 1977.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston, MA, American Meteorological Society, 1933.
- MEIGH J.R., MCKENZIE A.A., SENE K.J., *A grid-based approach to water scarcity estimates for Eastern and Southern Africa*, *Water Resources Management* n.13, 1999.
- MERCURIO R., MINOTTA G., *Arboricoltura da legno*, Bologna, CLUEB, 2000.
- MEYER L.D., HARMON W.C., *Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes*, *Transactions of the ASAE*, 22(1), 1979.
- MEYER L.D., MC CUNE D.L., *Rainfall simulator for runoff plots*, *Agricultural Engineering*, Vol.39, 1958.

- MINOTTA G., *Il ruolo delle produzioni legnose fuori foresta*, in “L’arboricoltura da legno: un’attività produttiva al servizio dell’ambiente”, Avenue media, Bologna, 2003.
- MINOTTA G., L.V., FERRI D., *Indagine sulla coltivazione del noce da legno (Juglans regia L) in alcuni ambienti dell’Appennino settentrionale e della pianura padana*, Monti e Boschi 3, 1993.
- MOLDENHAUER W.C., LONG D.C., *Influences of rainfall energy on soil loss and infiltration rates: I. Effect over a range of texture*, Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 28, 1964.
- MOORE I.D., BURCH F.J., *Modelling erosion and deposition: topographic effects*, Transactions of the ASAE, 29, 1986.
- MOORE I.D., BURCH F.J., *Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation*, Soil Science Society of America Journal, Vol. 50, 1986.
- MOORE I.D., WILSON J.P., *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation*, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 47, 5, 1992.
- MORGAN R.P.C., NEARING M.A., *Soil erosion models: present and future*. Proceedings Third International Congress of the European Society for Soil Conservation, Rubio J.L., Asins S., Andreu V., de Paz J.M., Gimeno E. Eds., Valencia, Key Notes Volume, 2000.
- MOSLEY M.P., *Experimental study of rill erosion*, Transactions of the ASAE, 1974.
- MOTRONI A., CANU S., BIANCO G., LOJ G., *Development of a Geographic Information System for assessing and monitoring Environmentally Sensitive Areas to Desertification in Sardinia*. Desertification: actors, research, policies, Comitato Nazionale per la lotta alla siccità e alla desertificazione, Roma, 20 novembre 2003.
- MURRAY MITCHELL J., *On the causes of instrumentally observed secular temperature trends*, Journal of the Atmospheric Sciences, n. 10, 1953.
- NACHTERGAELE J., POESEN J., *Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 24, 1999.
- NEARING M.A., *Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses*, Catena, 32, 1998.
- NEARING M.A., *Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 25, 2000.
- NEARING, M.A., FOSTER, G.R., LANE, L.J., FINKNER, S.C., *A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology*, Transactions of ASAE, Vol.32, 5, 1989.

- NEARING M.A., GOVERS G., NORTON L.D., *Variability in soil erosion data from replicated plots*, Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, 1999.
- NEARING M.A., LANE L.J., ALBERTS E.E., LAFLIN J.M., *Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs*, Soil Science Society of America Journal, Vol. 54, 1990.
- NOCENTINI S., *La rinaturalizzazione dei sistemi forestali: aspetti concettuali*, L'Italia Forestale e Montana, 55 (4), 2000.
- NOVOTNY V., CHESTERS G., *Delivery of sediment and pollutants from nonpoint sources: a water quality perspective*, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 44, 1989.
- OL'DEKOP E.M., *On evaporation from the surface of river basins*, Trans. Met. Obs. Iurevskogo, Univ. Tartu 4 in Russian, 1911.
- PALADINO A., *Individuazione di standards dimensionali delle aree di saggio per la caratterizzazione dendrometria di tipi forestali in Sicilia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2005.
- PALMIERI S., SIANI A., D'AGOSTINO A., *Tendenze evolutive e fluttuazioni climatiche*, AER, 1994.
- PALOMBO F., *Monografia sulla coltivazione del Frassino*, L'Agricoltura Italiana XIX a XXV, 1875-76.
- PARDÈ J., *Il cedro nella zona mediterranea francese*, Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali XXV, 1976.
- PARRY M., ARNELL N., MCMICHAEL T., NICHOLLS R., MARTENS P., KOVATS S., LIVERMORE M., ROSENZWEIG C., IGLESIAS A., FISCHER G., *Millions at risk: defining critical climate change threats and targets*, Global Environmental Change, n.11, 2001.
- PARSHALL R.L., *The improved Venturi flume*, Transactions ASCE, Vol. 89, 1926.
- PARSONS D.A., *Coshoc-ton-type runoff samplers, laboratory investigations*, SCS-TP-124, Washington D.C., 1954.
- PASTA S., LA MANTIA T., *L'impatto dell'attività agricola e la gestione delle aree protette: il caso della Riserva Naturale "Maccalube di Aragona"*, Naturalista Siciliano, S. IV, XXV (Suppl.), 2001.
- PATER S., PATER D., *Combating the expansion of the Gobi Desert, illustrated at the example of Shaanxi Province (China)*, Rebuilt the Green, Self-presentation of the Shaanxi Province Forestry Board., 1999.
- PIERVITALI E., COLACINO M., CONTE M., *Signals of climatic change in the Central-Western Mediterranean basin*, Theoretical and Applied Climatology, 1997.
- PIERVITALI E., COLACINO M., CONTE M., *Rainfall over Central-Western Mediterranean Basin in the period 1951-1995, Part. 1: precipitation trends*, Nuovo Cimento 21C (3), 1998.
- PIKE J.G., *The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate*, J. Hydrol. n.2, 1964.

- PIRANEO G., *Analisi della vegetazione e dei processi di rinaturalizzazione di Caporossello-Realmonte (AG)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2005.
- PIZZICHINI M., SCIORTINO M., RUSSO C., *Approvvigionamento della risorsa idrica: analisi tecnico-economica per la prevenzione della desertificazione a Licata*, ENEA CRCasaccia, 2002.
- PIZZURRO G.M., *Analisi dei processi di rinaturalizzazione nelle pinete artificiali dei Monti di Palermo (Sicilia nord-ovest)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- PLA SENTIS I., *Soil degradation and desertification in Mediterranean environments*, Rubio & Calvo eds, Geoforma Ediciones, 1996.
- POLEMIO M., CASARANO D., *Rainfall and drought in southern Italy (1821-2001), The Basis of Civilization*, Water Science, IAHS Publ., 2004.
- PRUDHOMME C., JAKOB D., SVENSSON C., *Uncertain and climate change impact on the flood regime of small UK catchments*, Journal of Hydrology, n. 277, 2003.
- QUARANTA G., SALVIA R., *Riqualificazione e gestione del territorio, lotta alla desertificazione e sviluppo sostenibile*, Franco Angeli, Milano, 2006.
- RANDISI G., *Le tecniche di rimboschimento in ambiente arido e su suoli calcarei in Sicilia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- RAPP J.F., *Error assessment of the Revised Universal Soil Loss Equation using natural runoff plot data*, M.S. Thesis, School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, 1994.
- RAUWS G., GOVERS G., *Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils*, The Journal of Soil Science, 39, 1988.
- REGIONE SICILIANA. ASSESSORATO TERRITORIO E AMBIENTE, *Piano stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I). Bacino Idrografico del Fiume Imera Meridionale*, 2006.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., YODER, D.C., MCCOOL, D.K., *RUSLE revisited: status, questions, answers and the future*, Journal of Soil and Water Conservation, 49, 1994.
- RICHARDS K., *Sediment delivery and drainage network*, In: Channel Network Hydrology, Eds. Beven K., Kirkby M.J., Wiley, New York, 1993.
- RIGOR I.G., COLONY R.L., MARTIN S., *Variations in Surface Air Temperature Observations in the Arctic, 1979-97*, Journal of Climate, vol. 13, 2000.
- RISSE L.M., NEARING M.A., NICKS A., LAFLEN J.M., *Error Assessment in the Universal Soil Loss Equation*, Soil Science Society American Journal, 57, 1993.
- RISULTATI POM – MARBOLEG - *Modelli per un'arboricoltura da legno sostenibile nelle Regioni dell'Italia Meridionale Azione 1*. Dipartimento di Colture Arboree dell'Università degli Studi di Palermo.



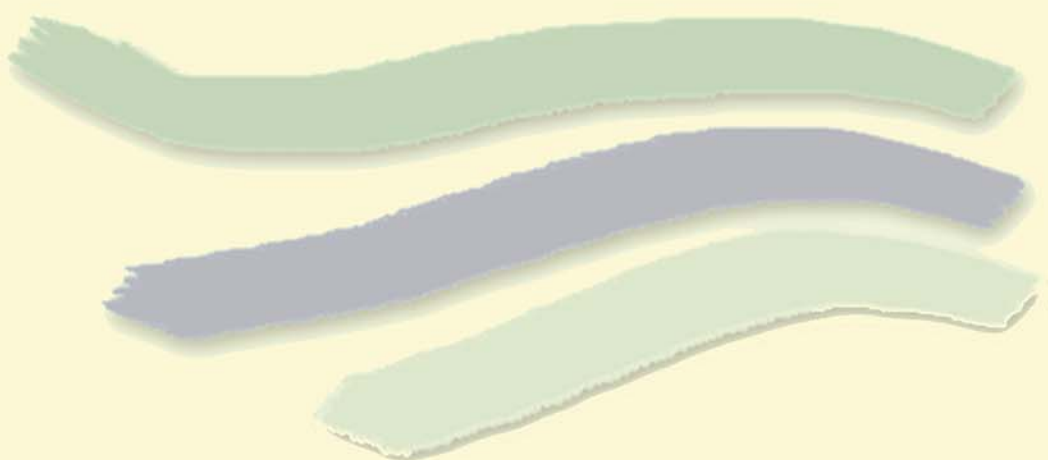
- ROMERO R., GUIJARRO J.A., ALONSO S.A., 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean region: first exploratory study, *International Journal of Climatology*, n 18, 1998.
- RUTTIMANN M., SCHAUB D., PRASUHN V., RUEGG W., *Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland - some critical considerations*, Catena, 25, 1995.
- SALVATI L., CECCARELLI T., BRUNETTI A., *Geo-database sul rischio di desertificazione in Italia - Agricoltura e degrado del territorio nello scenario del clima che cambia*, CRA-Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, Roma, 2005.
- SAMANI Z., MAGALLANEZ H., *Simple flume for flow measurement in open channel*, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 2000.
- SANKARASUBRAMAIAAN R.M., VOGEL, *Annual hydroclimatology of the United States*, *Water Resources Research*, vol. 38, 2002.
- SANTER B.D., WIGLEY T.M.L., BOYLE J.S., GAFFEN D.J., HNILO J.J., NYCHKA D., PARKER D.E., TAYLOR K.E., *Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, 2000.
- SAPORITO L., *Aspetti Selvicolturali delle pinete di pino domestico in Sicilia*, *Sviluppo Agricolo* n.7/8, 1995.
- SAPORITO L., *Stato attuale e problematiche selvicolturali dei rimboschimenti di eucalipto in Sicilia*, *Sherwood* n. 38, 1998.
- SAPORITO L., *Prospettive di impiego per usi energetici della biomassa di eucalipto in Sicilia*, *Sherwood*, 2001.
- SAUCHYN D.J., BARROW E.M., HOPKINSON R.F., LEAVITT P.R., *Aridity on the Canadian Plains*, *Geographie physique plains*, vol. 56, 2002.
- SAUQUET E., GOTTSCHALK L., LEBLOIS E., *Mapping Average Annual Runoff: a Hierarchical Approach Applying a Stochastic Interpolation Scheme*, *Hydrological Sciences Journal*, n.45(6), 2000.
- SCALZO G., *Primi risultati sull'applicazione del regolamento CEE 2080/92 in Sicilia*, *Tesi di Laurea*, Università degli Studi di Palermo, 1998.
- SCHREIBER P., *U ber die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserfuhrung der Flu ße in Mitteleuropa*, *Z. Meteorol.*, n. 21, 1904.
- SCIORTINO M., *Review of existing assessment of sensitive areas in the Northern Mediterranean Region*, in *The MEDRAP Concerted Action to support the Northern Mediterranean Action Programme to Combat Desertification*, Enne G., Peter D., Zanolli C., Zucca C. (Eds.), Sassari. Fifth Workshop on Identification of Sensitive Areas in the northern Mediterranean, Roma 18-19 November 2003, 2004.
- SCIORTINO M., IAPICHINO G., *Specie ornamentali e da giardino e qualità dell'irrigazione*, *Tecnica Agricola* n. 3, 1995.

- SIAS - SERVIZIO INFORMATIVO AGROMETEOROLOGICO SICILIANO, *Carta regionale della vulnerabilità alla desertificazione*, Palermo, 2003.
- SICA A., *Primi risultati dei rimboschimenti su suoli della serie gessoso-solfifera nella provincia di Agrigento*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2003.
- SIMANTON J.R., RENARD K.G., *Seasonal change in infiltration and erosion from USLE plots in Southeastern Arizona*, Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, 12, 1982.
- SIMN - SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE, *Carta delle aree sensibili alla desertificazione*, Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionale, Roma, 1999.
- SLATTERY M.C., BRYAN R.B., *Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment*, Earth Surface Processes and Landforms, 1992.
- SLATTERY M.C., BURT T.P., *Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and streamflow*, Earth Surface Processes and Landforms, 1997.
- SNEYERS R., *Use and misuse of statistical methods for detection of climatic change*, in Climate Change Detection Project, Report on the Informal Planning Meeting on Statistical Procedures for Climate Change Detection, WCDMP (20), 1992.
- SOIL SURVEY STAFF, *Keys to Soil Taxonomy*, 10th ed. USDA-NRCS, Washington D.C., 2006.
- SOMBATPANIT S., JAI-AREE S., SERMSATANASUSDI P., HIRUNWATSIRI S., POONPANICH C., *Design of a double-split divisor for runoff plots*, in Boardman J., Foster I.D.L., Dearing J.A. Eds., Soil erosion on agricultural land, John Wiley and Sons, 1990.
- SUPPIAH R., HENNESSY K.J., Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia, 1910-1990, International Journal of Climatology, n.10, 1998.
- SZABOLCS I., *Salt-affected soils*, Boca Raton, Fl: CRC Press, Thomas H.A., 1981. Improved methods for national water assessment. Rep. Contract WR15249270, US Water Resource Council, Washington D.C., 1989.
- SZABOLCS I., *The concept of soil resilience*, In Greenland D.J., Szabolcs I. (Eds) Soil resilience and Sustainable Land Use, CAB International, 1994.
- SZABOLCS I., *An overview on soil salinity and alklinity in Europe. Soil salinization and alkalization in Europe*, Ed Misopolines European Society for Soil Conservation, 1996.
- SZALBOCS I., *Salt affected soils*, CRC PRESS Boca Raton Florida, 1998.
- TARALLO A., *Analisi ecologica e selvicolturale dei rimboschimenti di cedro dell'Atlante (Cedrus atlantica Manetti) in una stazione dei Monti Sicani-Bivona (AG)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- THORNTHWAITE C.W., *An approach toward a rational classification of climate*, Geographical Review, n.38(1), 1948.

- TOFANI M., *L'economia dei rimboschimenti e la ricostituzione dei boschi deteriorati*, Atti del Congresso Nazionale sui rimboschimenti e sulla ricostituzione dei boschi degradati, Firenze 12-15 aprile 1961, Vol I.
- TOMASELLI R., - *Problemi naturalistici del rimboschimento nel Mediterraneo*. Informatore Botanico Italiano, 11 (3), 1981.
- TOMOZEIU R., BUSUIOC A., MARLETTO V., ZINONI F., CACCIAMANI C., *Detection of changes in the summer precipitation time series of the region Emilia-Romagna, Italy*, Theor. Appl. Clim., n. 67, 2000.
- TOY T.J., FOSTER G. R., RENARD K.G., *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*, John Wiley & Sons, 2002.
- TRAINA G., *La carta delle tipologie forestali quale strumento per la gestione degli habitat Natura 2000 del SIC ITA040005 - Monte Cammarata, Contrada Salici (Monti Sicani - AG)*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2005.
- TRUMAN C.C., BRADFORD J.M., *Laboratory determination of interrill soil erodibility*, Soil Science Society of America Journal, 1995.
- TURKES M., Vulnerability of Turkey to Desertification With Respect to Precipitation and Aridity Conditions, Tr. J. of Engineering and Environmental Science, n.23, 1999.
- TURTURICI T.P., *Produttività del noce da legno in diversi ambienti siciliani*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2001.
- UNEP, *World Atlas of Desertification*, 1992.
- VAN DE GIESEN N.V., STOMPH T.J., DE RIDDER N., *Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape*, Hydrological Processes, 2000.
- VAN DIJK A.I.J.M., MEESTERS A.G.C.A., BRUIJNZEEL L.A., *Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments*, Soil Science Society of America Journal, 2002.
- VARVARO A., *Spazializzazione di variabili idrologiche per la derivazione di indici di vulnerabilità alla desertificazione*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Palermo, 2007.
- VENTURA F., ROSSI PISA P., ARDIZZONI E., *Temperature and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999*, Atmospheric Research, n. 61, 2002.
- VINNIKOV K.Y., GRODY N.C., *Global Warming Trend of Mean Tropospheric Temperature Observed by Satellites*, Science, vol. 302, 2003.
- VÖRÖSMARTY C.J., MOORE B., *Modelling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: an example using the Zambesi river*, Surv. Geophys. n. 12, 1991.
- WALLING D.E., *The sediment delivery problem*, Journal of Hydrology, 65, 1983.

- WALLING D.E., QUINE T.A., *The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys*. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins, Proc. of the Oslo Symposium, IAHS Publ. n. 210, 1992.
- WENDT R.C., ALBERTS E.E., HJELMFELT A.T. JR., *Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots*, Soil Science Society of America Journal, 1986.
- WICHT B., Lotta alla desertificazione, 10 rivista WWF, 2003.
- WILKIN D.C., HEBEL S.J., *Erosion, deposition and delivery of sediment to midwestern streams*, Water Resources Research, 13, 1982.
- WISCHMEIER W.H., JOHNSON C., CROSS B., *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*, Journal of Soil and Water Conservation, 26(3), 1971.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*, USDA Agriculture Handbook, n. 282, 1978.
- XU C.Y., *Climate change and hydrologic models: a review of existing gaps and recent research developments*, Water Resources Management n.13, 1999.
- YUE S., WANG C., *The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series*, Water Resources Management n.18, 2004.
- ZANCHI C., *Problemi relativi alla simulazione della pioggia e caratteristiche di alcuni simulatori di pioggia per lo studio dell'erosione idrometeorica*, Annali dell'Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, 1979.
- ZHANG X., VINCENT L.A., HOGG W.D., NIITSOO A., *Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th Century*, Atmosphere-Ocean, n.38(3), 2000.
- ZHANG X., WALLING D., HE Q., *Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements*, Journal of Hydrological Sciences 44(1), 1999.
- ZHANG X.C., NEARING M.A., MILLER W.P., NORTON L.D., WEST L.T., *Modeling interrill sediment delivery*, Soil Science Society of America Journal, 62, 1998.
- ZHANG X.C., NEARING M.A., RISSE L.M., MCGREGOR K.C., *Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data*, Transactions of the ASAE, 39, 1996.





**OSSERVATORIO DELLE ACQUE**

Via G. Bonsignore, 1 – Palermo

Tel. +39 0917079616 - fax +39 0917079584

[www.osservatorioacque.it](http://www.osservatorioacque.it) - [info\\_settore2@arrasicilia.it](mailto:info_settore2@arrasicilia.it)