

Projet de développement intégré du Nord et du Nord-Est du Kef

Convention CRDA Le Kef - ESAK - IRD "Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion"

Opération: "Suivi pédologique de l'érosion des versants et impact des différentes techniques de CES sur les bilans de l'eau et des transports solides"

Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne)

Jean COLLINET (*), Patrick ZANTE (*), Olivier BALIEU (*), Mohsen GHESMI (**)

mission I R D de Tunis, avril 2001



Zanfour: ravinement des rives gauches du bassin en moyen aval

Ministère de l'Agriculture
CRDA du Kef
PDAINNEK

ESAK
Ecole Supérieure d'Agriculture
du Kef

IRD
Institut de recherche
pour le développement

(*) IRD
(**) CRDA Kef

SOMMAIRE

	pages
Préambule	2
Objectifs	2
Environnement	
documents utilisés, localisation	3
caractéristiques techniques du barrage	3
éléments du climat	3
géologie, géomorphologie	4
activités agricoles	5
Méthodes	
principes généraux	5
l'indice topographique	7
les aménagements de conservation eaux - sols	9
les types d'occupation des sols	10
l'érodibilité des sols	14
l'érosivité des pluies	15
Résultats, commentaires	
différentes "couches" d'information	16
érosivité des pluies, Rsi	17
érodibilité des sols, Ksi	17
topographie, SL	18
occupation des sols, C	20
travaux de CES, P	20
cartes des indices calculés	
carte de l'indice K	21
carte de l'indice SL	22
carte de l'indice C	23
carte de l'indice P	24
synthèse : susceptibilité à l'érosion	25
carte pour R = 45 m.t/ha.h	29
carte pour R = 75 m.t/ha.h	30
carte pour R = 165 m.t/ha.h	31
Conclusion	32
Bibliographie	34
Annexes	37

PREAMBULE

L'évaluation des risques d'érosion sur le bassin versant cultivé du barrage collinaire de Zanfour est une des actions de recherche prévues dans le cadre du "Programme de Développement Intégré du Nord et du Nord-Est du Kef" (projet PDAINNEK). Ce travail est une des réponses aux problèmes posés dans le texte de la convention "développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion" signée entre le CRDA du Kef, l'ESAK et l'IRD.

Le travail de terrain, débuté fin janvier 2001, s'est déroulé en trois missions. Les missions du 23 au 25 janvier et du 13 au 15 février 2001 ont permis de recueillir toutes les informations pour construire un modèle et dresser les différentes cartes utilisées dans un SIG. Une dernière mission, les 29 et 30 mars 2001, a permis de vérifier l'exactitude du contenu des unités cartographiques retenues.

Une information didactique préliminaire sur les objectifs prévus et les méthodes utilisées a été fournie, le 23 janvier 2001, à une quinzaine de personnes impliquées dans le projet et réunies dans les locaux du CRDA par Monsieur Ali Bouaïcha, chef du projet PDAINNEK.

Trois notes écrites consignnant les états d'avancements successifs des travaux furent communiquées au chef de projet à l'issue de chacune des missions de terrain, ce, pour son information personnelle et pour une diffusion auprès des co-signataires de la convention.

OBJECTIFS

Le site de Zanfour, situé dans le Haut Tell, intéresse fortement le CRDA du Kef en raison de la forte demande en eau et des aménagements spontanés qu'il a suscités. Du point de vue hydrologique il complète de manière intéressante le dispositif expérimental installé en réseau sur une vingtaine d'autres



barrages et retenues dans le cadre de la convention IRD /DCES. Du point de vue pédologique, il fournit également des compléments d'informations sur les comportements hydrodynamiques et érosifs d'un large éventail de sols différenciés sur des versants généralement plus longs que ceux des bassins de quelques centaines d'hectares étudiés jusqu'alors.

L'objectif principal est une carte de prévision des risques de dégradations physiques liées à l'érosion hydrique sur les terres du bassin versant de ZANFOUR (Fig 1.), cette détermination servant ultérieurement à une évaluation des intensités et vitesses de comblement du lac du barrage par des sédiments. La méthode utilisée permet une bonne évaluation de ce risque calculé en raison des variations interannuelles de l'agressivité des pluies et des types d'occupation des sols.

Les autres représentations cartographiques annexées à cette notice proviennent d'informations préliminaires

Figure 1 : localisation du bassin versant de Zanfour

nécessaires à la réalisation de la carte des risques érosifs. Provenant toutes de l'analyse du milieu physique du bassin et de l'utilisation qu'en font les paysans, elles constitueront autant de synthèses également utiles à d'autres fins, telles que la recherche d'aptitudes forestières et agricoles.

ENVIRONNEMENT

Documents utilisés, localisation

Les documents suivants ont été utilisés :

- carte topographique : feuilles n° 52 EBBA KSOUR et feuille n° 53 MAKTAR au 1/50 000
- photographies aériennes, certaines photos des missions :
 - . 1963 LII 250, 1/25 000, (photos 32, 33, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 75, 76, 77, 78),
 - . 1974 359/250, 1/25 000, (photos 1752, 1753, 1754, 1755, 1756, 1822, 1823, 1824, 1825, 1826, 1881, 1882, 1883, 1884, 1885),
 - . 1990 LC5B, 1/60 000, (photos 5 et 6).
- carte géologique : feuille EBBA KSOUR n°52 à 1/50000.

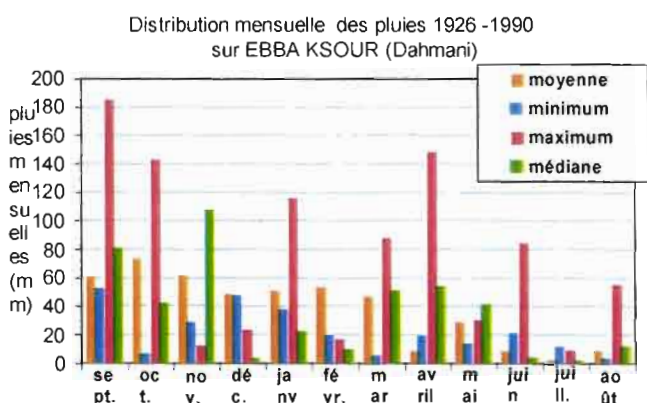
Le bassin versant est en limite de deux Gouvernorats (Siliana et Le Kef), le site du barrage est, quant à lui, à la limite de deux Délégations (Sers et Ksour).

Le barrage est situé sur le gouvernorat du Kef, les coordonnées de la digue sont les suivantes : Nord 35° 57' 51.6'' (296.426 Lambert) , Est : 09° 00' 14.9'' (419.214 Lambert).

Caractéristiques techniques du barrage

La construction du barrage de Zanfour date de décembre 1996. Sa capacité est de 2 600 000m³. La superficie du bassin versant est de 4300 ha. Il est équipé d'un déversoir avec seuil maçonné en rive gauche. Ce déversoir fonctionnait à raison de quelques m³ / sec. lors de notre première mission de la fin janvier 2001.

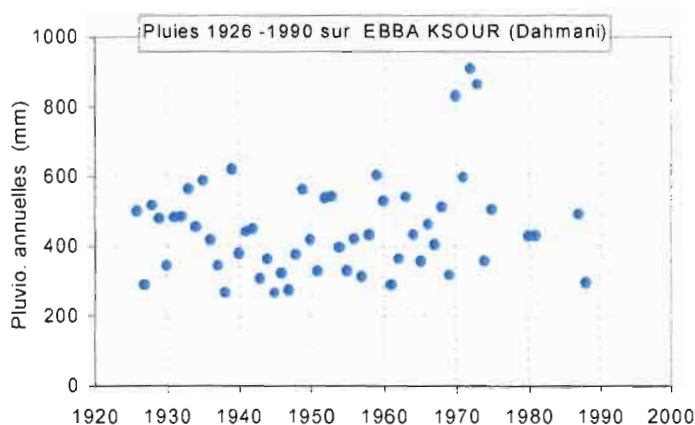
Eléments du climat



La zone étudiée se situe sous une pluviométrie de 400 à 500mm. Elle appartient au bioclimat semi-aride inférieur de nuance continentale avec une amplitude thermique annuelle forte de 32 à 33°C.,

Figure 3 : Ebba Ksour, précipitations 1926-1990

Figure 2 : Pluies mensuelles moyennes, médianes, maximales et minimales sur Ebba Ksour entre 1926 et 1990

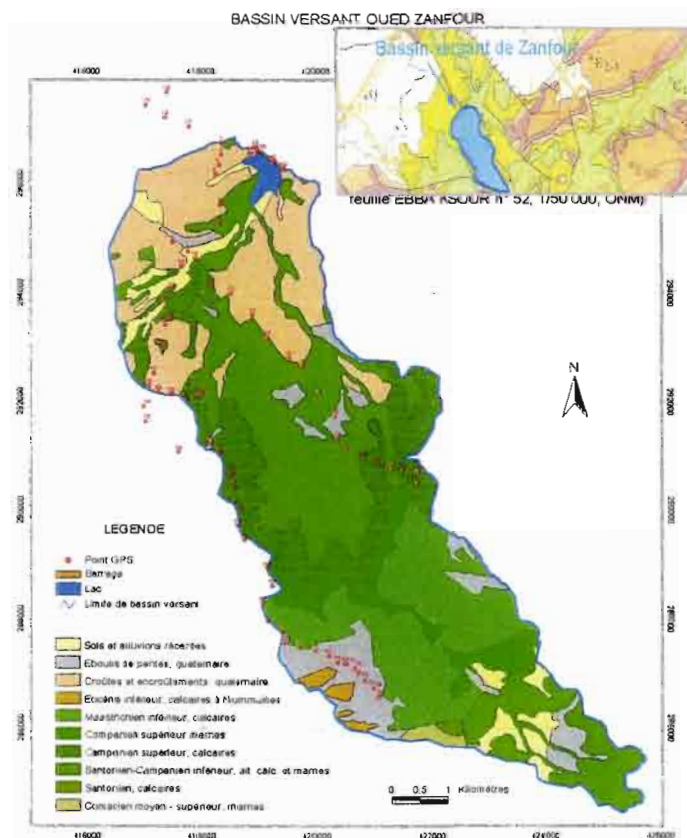


une saison sèche de 7 mois, 80 jours de pluies entre septembre et mai et une humidité atmosphérique moyenne annuelle de 65%.

L'équipement du bassin versant de Zanfour est trop récent pour pouvoir disposer d'une longue série de données pluviométriques, c'est la raison pour laquelle nous avons utilisé les informations du poste d' Dahmani (ex Ebba Ksour) qui, à moins de 15km du bassin versant, a fonctionné de 1926 à 1990 et est situé dans une position topographique permettant tous rapprochements.

La pluviométrie médiane d'Ebba Ksour est de 431mm (année représentative = 1980), on note un minimum de 267mm en 1945 et un maximum de 909mm en 1972 (fig. 2), ces deux dernières valeurs correspondent à une occurrence cinquantenaire. Ces valeurs seront prises en compte pour l'évaluation des agressivités des pluies à l'origine de risques érosifs. La figure 3 montre qu'il est impossible de détecter quelque périodicité que ce soit dans la distribution de la pluviométrie sur la période considérée. Ceci illustre la grande difficulté d'une prévision des risques liés aux événements paroxysmaux dans le bassin méditerranéen même avec de longues séries de données.

Géologie, géomorphologie



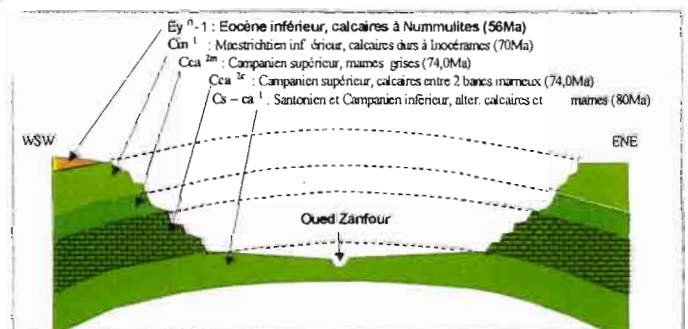
La géologie est la première information à saisir pour toutes études sur la genèse des modelés et la différenciation des sols qui les couvrent.

Le bassin s'inscrit dans un anticlinal surcreusé en son axe par l'oued Zanfour, (figure 4). Cet anticlinal fait partie d'un ensemble de compartiments orientés NO -SE alternativement effondrés ou surélevés à la façon de horst et graben issus de failles entaillant perpendiculairement les anticlinoriums et synclinoriums NE - SO constituant l'armature de la dorsale tunisienne (cf détail). Les roches les plus âgées datent du Campanien (Crétacé supérieur vers -80.10^6 années) et occupent le centre du bassin versant. Vers ses limites latérales et en amont, on découvre des formations de plus en plus récentes jusqu'à la base du Tertiaire (Eocène inférieur, vers -56.10^6 années).

Figure 4 : esquisse géologique du bassin de Zanfour

L'érosion géologique de toutes ces séries a abouti, au Quaternaire (à partir de $-1,6. 10^6$ a), à la formation de la vallée du Zanfour dans un vaste glacis dont on retrouve des restes de surfaces encroûtées en bancs carbonatés calcaires plus ou moins épais, consolidés ou friables (torba).

Ultérieurement, des dépôts alluviaux et colluviaux



ont recouvert çà et là toutes les formations antérieures. La coupe géologique transversale du bassin synthétise ces informations.

A partir de ces différentes roches vont se différencier des paysages spécifiques et leurs couvertures pédologiques dont nous nous proposons de tester les comportements hydrodynamiques et érosifs.

L'amont du bassin versant culmine à plus de 1100m (Djebel Bel Hassen à +1121m). Le lac fermant le bassin en aval est à +600m, ceinturé par des collines culminant à quelque 720m.

L'amont SE du bassin versant à épais bancs calcaires donne un paysage montagneux si l'on excepte un replat ondulé vers +1000m au SE d'une faille transverse mettant en contact Maestrichtien et Santonien (Djebel Hamaid). Dans cette zone, l'oued coule, de façon permanente selon les paysans, en une gorge encaissée comme le sont les thalwegs des deux rives. Le long de ce cours on découvre des élargissements, de quelques dizaines de mètres, bordés de terrasses alluviales dominant le lit de quelque 5 à 7m.

Au milieu du bassin affleure le Santonien marneux à fines intercalations calcaires (confluence du Djébel Zaouara), le relief s'atténue, la vallée s'élargit. Elle est limitée latéralement par deux chaînons de collines ou des corniches calcaires campaniennes distantes de 2500m à 3000m. En leurs piémonts se raccordent de longs versants concaves puis rectilignes généralement sur colluvions épais.

Dans une partie moyen amont les versants s'entaillent profondément de ravins dès qu'affleurent les marnes santoniennes. En moyen aval ces versants deviennent rectilignes et s'encroûtent. Là, l'oued Zanfour coule sur les marnes et argilites du Campanien inférieur, ses berges se transforment alors en bad-lands lorsque les ravins incisant les bas des versants deviennent coalescents.

Près d'un tiers du bassin, vers l'amont et en rive droite, est foresté avec des sols encore riches en matières organiques et parfois assez épais, ceci est probablement la conséquence d'une pression démographique moins forte qu'ailleurs. En rive gauche amont et sur tout l'aval, cette forêt a reculé pour laisser la place à des terres de parcours ou des cultures.

Les activités agricoles

Les informations de ce paragraphe proviennent de données collectées lors de nos missions mais aussi du rapport de Mourad Rekik et Samira Chekali (2001).

Le bassin versant compte 45 exploitations agricoles sédentaires regroupées en 4 douars plus ou moins étendus. La tenure des terres est parfois difficile à élucider entre la stricte propriété, des terres non cadastrées et d'autres, semble-t-il, régies en indivision.

Nos collègues agronomes ont identifié trois systèmes d'exploitation en pluvial, considérant que la présence du barrage n'a pas encore fondamentalement modifié les systèmes précédents. Ils considèrent que, pour le moment, il est plus judicieux de parler de changements plus ou moins permanents d'itinéraires cultureux dont la pérennité dépendra de l'accessibilité à l'eau.

Mourad Rekik et Samira Chekali ont identifié les systèmes en sec (parfois complémenté d'irrigation) suivants :

S1 : polyculture vivrière diversifiée de quelque 8,6ha en moyenne avec production de céréales, fourrage, cultures maraîchères irriguées, donc près du lac (tomates, piments), et un élevage bovin allaitant (Holstein),

S2 : polyculture – élevage en sec strict de quelque 28ha en moyenne et produisant céréales et élevage ovin de belle taille,

S3 : polyculture en sec strict en parcelles de petites tailles (4,6 ha en moyenne) avec un élevage ovin de faible taille.

La sole est biennale avec une alternance jachère-céréale. L'orge domine largement sur le blé dont la production passe pour aléatoire dans cette région, et sur l'avoine que tout exploitant cultive mais en petites parcelles. Les surfaces emblavées en orge sont proportionnelles à l'importance de l'élevage ovin, cet orge est surtout utilisé en fourrage, les grains n'intervenant que dans le cas d'engraissement des agneaux.

Un complément alimentaire est assuré par les recrûs et regains sur jachères et ou parcours. Des améliorations sont attendues dans cette intégration élevage / culture sur deux voies : (i) amélioration des productions en biomasses, (ii) conduite des troupeaux.

Concernant la seule biomasse, les efforts portent sur :

- . une amélioration de la production d'orge (fourrage et grain) par une recherche variétale, une fertilisation et un traitement phytosanitaire,
- . l'amélioration des jachères par modification de leurs compositions florales avec des semis automnaux en espèces mieux appréciées
- . la recherche de ressources alimentaires alternatives pour le bétail (pulpes de tomates, grignons d'olives, amélioration des valeurs nutritives des pailles avec de l'urée),
- . enfin une recherche sur les arbustes fourragers naturels ou à introduire dans la reforestation.

S'agissant d'une gestion intégrée, et si possible durable, sur petit bassin versant, nos préoccupations rejoignent celles de nos collègues agronomes dans les domaines suivants :

- . identification de zones de moindres risques érosifs en relation avec les caractéristiques physiques du milieu pour déterminer une charge optimale de bétail à l'hectare,
- . identification des zones à meilleurs potentiels physico-chimiques pour l'amélioration des productions de biomasse (autre utilisation de la carte pédologique)
- . évaluation des réserves hydriques utilisables des sols pour toutes évaluations des productions actuelles ou pour toutes améliorations de ces productions en agissant sur des calages de cycles culturaux (autre utilisation de la carte pédologique).

METHODES

Principes généraux

Le calcul des risques d'érosion et la représentation cartographique de ces "iso-risques érosifs" nécessitent la saisie de différentes couches d'informations paramétrées dans un modèle de prévision des érosions puis d'illustrer le résultat des calculs dans un Système d'Information Géographique, (ARC VIEW). Le modèle prédictif d'érosion RUSLE (1993, 1994 et 1995) a été retenu car ses révisions successives l'ont rendu pertinent dans le cadre de notre bassin versant où les longueurs de segments homogènes de versant n'excèdent pas 300m. Une autre amélioration fut portée sur la possibilité de pondérer le coefficient topographique par les modes d'érosions visibles sur le terrain.

S'il convient de garder son sens critique quant aux informations livrées par ces modèles dans des milieux où existe parfois une forte composante ravinante, voire des risques de mouvement de masse, nous avons aussi pu constater que d'un BV à l'autre et toujours dans ce domaine méditerranéen, les données sortant de ce modèle pouvaient être comparées entr'elles et qu'elles avaient aussi une assez bonne cohérence avec les données mesurées par ailleurs sous simulation de pluies.

L'inventaire de terrain est mené selon la procédure classique avec un travail plus approfondi sur des zones témoins préalablement repérées par photo-interprétation puis une extrapolation de l'information pour couvrir la totalité du bassin; une dernière mission permet enfin de vérifier les contenus et contours des unités retenues.

La collecte de l'information a porté sur:

- a) la topographie pour relever la longueur, la régularité, les inclinaisons des segments de versants homogènes,
- b) les aménagements et techniques de CES,
- c) l'occupation actuelle des sols tant en ce qui concerne les couverts dits "naturels" que les extensions et types de cultures ainsi que les assolements pratiqués,
- d) l'érodibilité des sols, nécessitant au préalable l'établissement d'une carte pédologique définie par une taxonomie très adaptée à l'échelle de restitution finale mais aussi aux caractéristiques hydrodynamiques et structurales des sols,
- e) une caractérisation de l'érosivité des pluies annuelles.

L'indice topographique

Inclinaison de segments homogènes de versant

Le document de base est la carte topographique au 1/50 000 agrandie au 1/30 000. L'indice topographique se construit en prenant en compte deux paramètres: (i) l'inclinaison (ii) la longueur de segments de versants homogènes c'est-à-dire ayant, en coupe, le même profil (en gros... rectiligne, convexe, concave)

Pour l'inclinaison des segments de versants, la méthode, préconisée par la FAO (1993), consiste à déplacer sur la carte topographique un petit cercle gravé sur un transparent et à noter le nombre de courbes de niveau vues dans ce cercle. Le **tableau I** en **annexe 1** donne les pentes (en %)

correspondant à des cercles de 0.5, 0.75, 1.0 et 1.5 cm utilisés sur des cartes au 1/10000, 1/12500 ou 1/20000 pour une équidistance de 10 m.

Des segments tracés perpendiculairement aux courbes de niveau et comprenant une ou plusieurs courbes sont mesurés manuellement sur la carte ou à l'aide d'un logiciel de cartographie assistée. Un tableur contenant les données précédentes permet le calcul rapide des pentes. Cette méthode, appliquée sur le bassin versant de Zanfour (**tabl. I, annexe 2, fig. 5**) aide à déterminer les classes des pentes représentatives du bassin en analysant les différentes inflexions de la courbe cumulative.

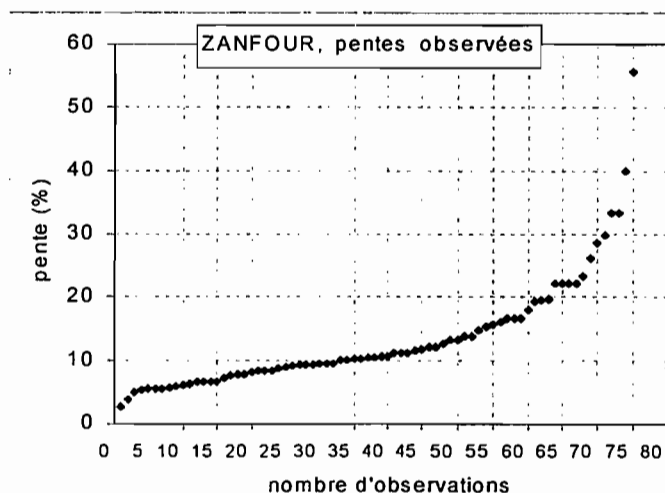


Figure 5: Pentés observées sur le BV de Zanfour

Combinaison pente + longueur homogène de segment de versant

Le calcul de cet indice, en utilisant le logiciel RUSLE adapté au Maroc, combine pente et longueur de segment de versant ayant la même inclinaison. Par rapport à la formule usuelle du programme non modifié, il est corrigé selon un rapport établi entre les importances respectives des érosions en rigoles et en nappe telles qu'elles peuvent être détectées sur le terrain. Les **figures 6, 7 et 8** montrent l'importance de ces modifications de l'indice SL pour des érosions en rigoles jugées faibles, moyennes ou fortes, sur le terrain, par rapport à l'érosion aréolaire.

Les options permises par le logiciel sont les suivantes:

- nombre de segments et précision sur leurs longueurs égales ou variables
- choix des rapports " érosion en rigole/érosion en nappe", (fort, moyen, faible)
- choix entre une mesure horizontale projetée ou sur la pente du segment considéré,
- enfin, entrée des données pour chaque segment de son inclinaison et de sa longueur.

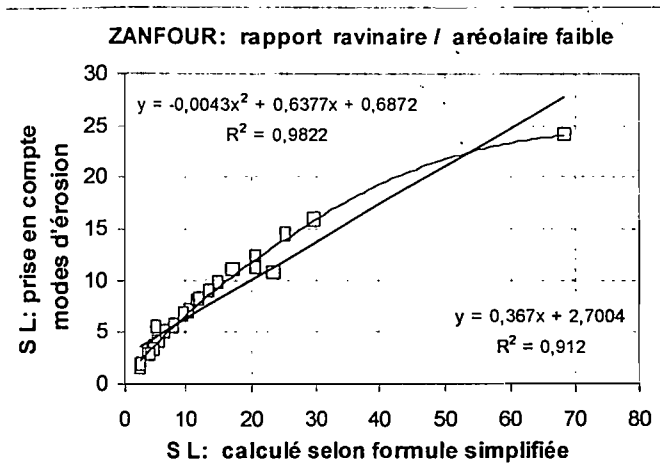


Figure 6: calcul des indices de pentes selon deux méthodes (faible intervention de l'érosion ravinaire)

Le logiciel limite la longueur totale d'un segment à 300 m, or il arrive que celui-ci dépasse cette limite.

Une solution a consisté à ne mesurer que des segments de longueur inférieure à 300m, mais cela excluait les calculs sur pentes faibles pour lesquelles les distances inter-courbes sont souvent supérieures à cette distance.

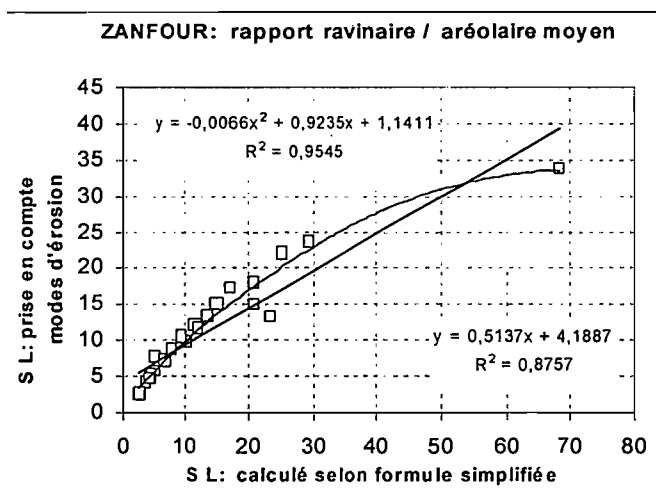


Figure 7: calcul des indices de pentes selon deux méthodes (intervention moyenne de l'érosion ravinaire)

La solution appliquée fut la suivante :

. calcul de l'indice SL selon la formule de Wischmeier (sans correction tenant compte des 2 modes d'érosion):

$$SL = (1.8\sqrt{L/100}) * (0.76 + 0.53 * p\% + 0.076 * p\%^2) \quad (1)$$

. calcul des indices SL par le logiciel RUSLE (version Maroc) pour des segments < 300 m (2)

.. établissement des corrélations entre (1) et (2) pour trois catégories de rapports érosion ravinaire érosion aréolaire: faible, moyen, fort

.. calcul des indices SL pour toutes les longueurs de pente à partir des courbes de régression,

.. enfin, détermination des classes d'indices SL

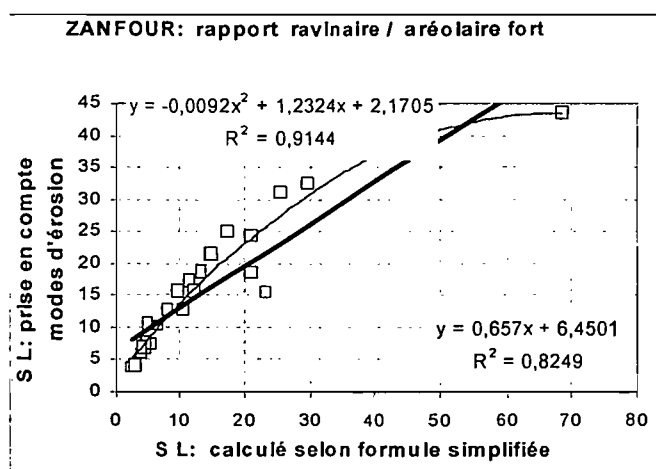


Figure 8: calcul des indices de pentes selon deux méthodes (forte intervention de l'érosion ravinaire)

Le tableau en annexe 3 donne le détail des calculs des indices SL et des classes retenues comme unités cartographiques. La figure 9 illustre une distribution de ces indices en fonction du nombre de segments levés sur le terrain.

ZANFOUR: distribution des indices de pentes S L

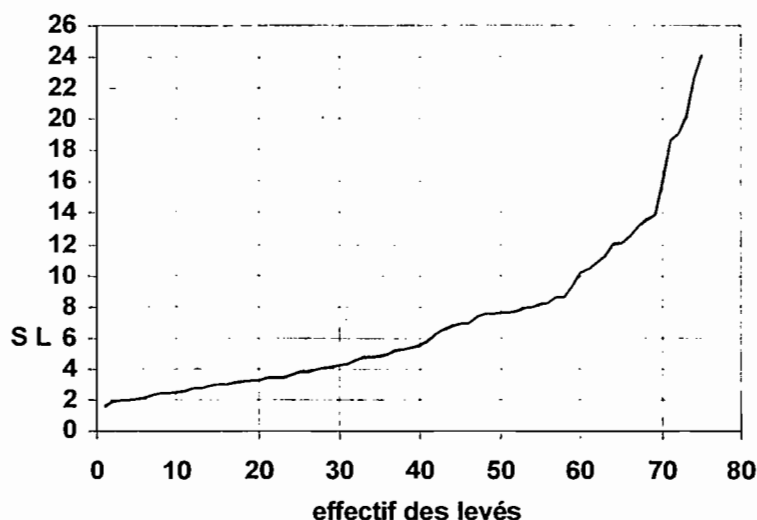


Fig. 5 Distribution des indices SL

Les aménagements C E S

Cette carte est établie en combinant la photo-interprétation et l'observation du terrain. Les principaux aménagements sont les banquettes de terres isohypses des zones cultivées et celles des olivettes. Ces banquettes sont anciennes et pour la grande majorité "amorties" c'est-à-dire comblées au 3/4 ce qui est une preuve encourageante du bon fonctionnement de ce système en Tunisie semi-aride. La hauteur des sédiments ayant comblé le canal de la banquette atteint rarement 1m; on trouve plus souvent 0.2 à 0.5 m avant la crête de la banquette.

Les autres aménagements sont des cordons de pierres sèches disposés dans les collines à affleurements rocheux ou à sols peu épais de l'amont du bassin ; dans ce secteur ils se transforment souvent en terrasses dans les zones de reboisement .

Certains affluents en rive droite vers le centre foresté du bassin sont traités en corrections torrentielles avec des murets de pierres sèches ou maçonnées transversaux aux cours d'eau.

Les indices de pratiques anti-érosives P

L'indice P est le rapport, sans dimension, entre:

. des érosions mesurées avec un travail du sol dans le sens de la plus grande pente, tous autres facteurs étant égaux, et pour lesquelles aucune protection n'intervenant on a $P = 1$

. et les érosions diminuées par les effets de toutes techniques de protection, tous autres facteurs étant par ailleurs égaux.

La carte de cet indice P est établie sur les bases d'une carte des aménagements de C E S et d'une carte des pentes ; l'efficacité des aménagements isohypses varie selon la pente.

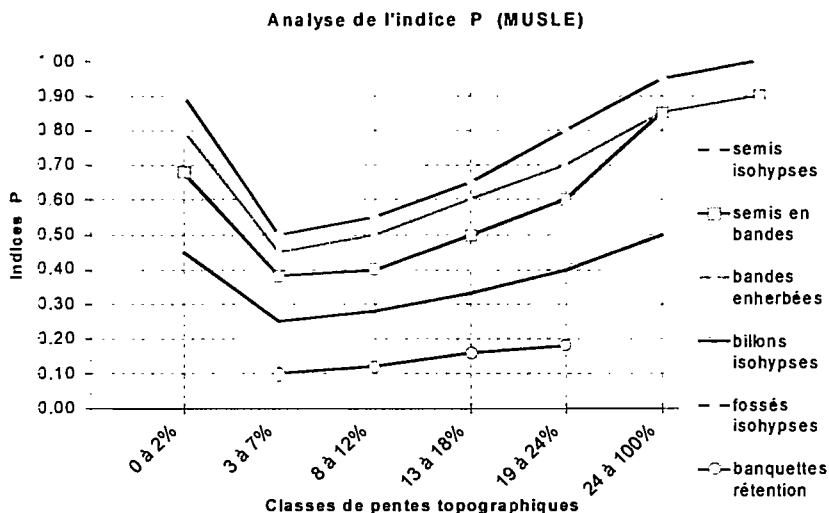
L'indice P varie donc théoriquement entre 0 (arrêt total de toutes érosions) et 1 (aucune protection assurée par ces techniques).

Tableau III : Zanzour valeurs retenues pour les indices P

Travaux CES	penne %	indice P
banquettes avec ou sans plantations	5-10	0,10
banquettes avec ou sans plantations	10-15	0,12
banquettes avec ou sans plantations	15-20	0,16
cordons de pierres	-	0,35
ados espacés de 25 m	-	0,45
ripage suivi de reboisement	-	0,60

Une analyse bibliographique a permis d'établir le tableau III.

L'efficacité des techniques est en rapport avec la topographie. On constate ainsi que le travail en courbes de niveau perd son efficacité pour des pentes > 20%.



Les pondérations liées aux aménagements isohypses sont représentées sur le graphique de la figure 6.

Figure 6: variation de l'indice P selon la pente pour différents aménagements isohypses

Les types d'occupations des sols

L'information sur l'occupation des sols s'obtient par l'interprétation des photographies aériennes combinée à une prospection sur le bassin. Différentes situations ont été identifiées:

- . des cultures annuelles qui sont essentiellement des céréales (blé et orge) alternant une année sur deux avec des jachères.

- . des garrigues denses et des garrigues claires caractérisent les terrains qui ne sont jamais cultivés et qui sont réservés au parcours par les animaux. La "garrigue dense" cartographiée sur le bassin est une formation végétale buissonnante pouvant aller jusqu'à 1 m de haut, souvent constituée de romarins. On a distingué une "garrigue claire" lorsque la densité du couvert devenait inférieure à 10%, ce sont alors des ligneux bas rabougris.

- . l'oued et ses principaux affluents sont souvent occupés par une formation hygrophile clairsemée, par des bancs rocheux nus ou des épandages de graviers et cailloux émoussés; cet ensemble constitue une surface non négligeable du bassin versant; les rives des oueds sont escarpées ou peuvent s'élargir avec des pentes ravinées.

- . des forêts qui couvrent, essentiellement, la partie moyenne et amont du bassin versant. On a distingué les surfaces en forêt dense, avec des pins atteignant 10 à 15m, surmontant une strate de sujets plus jeunes culminant vers 2 à 4m puis une strate buissonnante (1m maxi) et enfin une litière de 3 à 5cm (horizons A00 et A0), particulièrement épaisse dans les zones les mieux conservées.

- . de la forêt claire qui s'identifie par ses arbres épars, d'âge et de taille variables, formant un couvert très discontinu au-dessus d'une garrigue en bon état avec des sols meubles et leurs litières

souvent encore continues mais plus minces que précédemment du fait d'une minéralisation des composés organiques accrue par l'éclaircissement.

. des surfaces reboisées récemment sont plantées en pins sur des lignes de ripage si la pente est faible, sur des terrasses sur les pentes fortes de l'amont du bassin par exemple.

. l'arboriculture fruitière qui inclut des plantations de noyers et les olivettes occupent de petites surfaces qui sont difficiles à cartographier avec précision à cette échelle ; seules les principales parcelles ont été signalées ; ces plantations arboricoles sont encore des spéculations en développement à l'aval et dans la haute plaine de l'amont.

Recherche sur les indices C d'occupation des sols

C'est également un indice sans dimension qui rend compte de la protection du sol par le couvert végétal. Il est défini par le rapport des pertes en terres entre la parcelle étudiée et une parcelle traitée en jachère travaillée n'ayant pas reçu de matière organique depuis au moins trois ans à qui est attribué un indice C de 1. C'est ce facteur qui a la plus grande amplitude de variation (de 0,01 à 1), il a donc une grande influence sur le calcul des pertes en terres.

On distingue deux cas : les surfaces en végétation naturelle et les parcelles cultivées annuellement. Pour la végétation naturelle le choix des indices C repose sur une analyse bibliographique orientée sur le domaine méditerranéen. Pour les cultures annuelles, il convient de tenir compte de la dynamique de développement du couvert tout au long de l'année, celle-ci déterminant des protections variables vis à vis de l'érosion.

Parcelles sur végétations " naturelles "

La plupart des analyses structurales des couverts végétaux naturels proviennent du continent américain nord (W.H. Wischmeier 1975), centre (C A T I E 1985) et sud (Q. Santana, 1985). Cette analyse repose sur la prise en considération de l'étagement des différentes strates depuis la cime des plus hauts

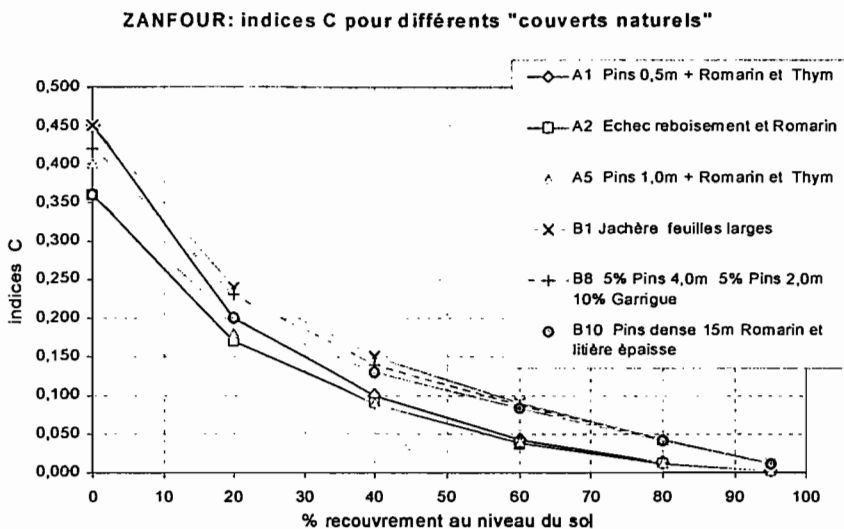
arbres jusqu'aux espèces rampantes.

Chacune de ces strates est caractérisée par sa hauteur, la densité du feuillage et par une définition succincte sur le port du feuillage ; toutes ces caractérisations sont évidemment orientées vers la connaissance de l'interception des énergies des pluies par les végétaux .

Sites	Occupation	% couvr. lign. hauts	% couvr. lign. bas	situation	% couvr. strate au sol	C
	Echec de reboisement et Romarins		25	A2	5	0,300
8	Forêt Pins 15 m + Romarins + Litière	60	10	B10	100	0,015
12	Jachère (feuilles larges)			B1	80	0,043
13	Rebois. Pins 1m + Romarin + Thym	5	20	A5	25	0,170
15	Rebois. Pins 0,5m + Romarin + Thym		10	A1	10	0,250
16	Jachère (feuilles larges)			B1	35	0,160
19	Jachère (feuilles larges)			B1	40	0,150
20	Garrigue claire + rares Pins		10	A2		0,260
21	Pins 4m(5%) 2m (5%) + Garrigue + Litière	10	10	B8	10	0,300
2	Jachère (feuilles larges)			B1	60	0,090
26	Jachère (feuilles larges)				40	0,150

Tableau IV : Zanfour - situations végétations "naturelles" rencontrées et indices C correspondants

Dans la pratique, le paramétrage de ces informations s'obtient sur parcelles en comparant, pendant de nombreuses années, les variations des érosions résultant des variations de ces structures végétales, tous autres facteurs étant , évidemment, par ailleurs égaux.



On s'est attaché à identifier diverses situations les plus en rapport avec les structures végétales méditerranéennes en général puis avec certaines adaptations permettant de rendre compte de la situation particulière de Zanfour.

La deuxième colonne du tableau IV énumère ces situations. Les abaques de la figure 7 permettent de retenir les valeurs de C de la dernière colonne du tableau IV.

Figure 7 : analyse des indices C pour des formations végétales « naturelles »

Parcelles en "cultures annuelles"

Alors que les indices de couverts dits « naturels » peuvent être considérés comme des invariants avec l'approximation liée à la présence en faibles quantités d'espèces caducifoliées, le calcul de cet indice C pour les plantes cultivées annuelles est plus complexe puisque ces couverts ont une dynamique saisonnière et, qu' à un moment donné, la densité du couvert dépend de la réussite de la culture ; on peut donc supposer que la fertilité du sol agit en partie sur cet indice.

Nous avons analysé différents travaux : RUSLE adapté à la situation marocaine, ceux de Heusch (1970), du CTFT (1979) et surtout ceux de J.M. Masson (1971) qui paraissent particulièrement bien adaptés au milieu tunisien et dont la durée des observations est une garantie de pertinence des indices retenus.

Le tableau V représente la variation saisonnière de l'indice C portant sur les couverts assurés par les céréales, les colonnes "périodes culturales" informent sur les situations ainsi que sur les périodes caractérisant ces situations:

- 1 labour ou jachère travaillée du 01/09 au 01/11
- 2 du 01/11 et le 01/12, préparation du lit de semence et semis
- 3 établissement de la culture, levée des semis du 01/12 au 01/03
- 4 couvert maximum, maturation, moisson du 01/03 au 15/06
- 5 chaumes, jachère pâturée, épuisement progressif du mulch épandu sur le sol

Tableau V : exemple de variation de l'indice C pour les céréales (J.M. Masson, 1971).

Culture exemples des indices C saisonniers d'une céréale, sans pâturage de plus de 2 ans consécutifs, les pailles étant exportées	Périodes culturales				
	1	2	3	4	5
	1/9 au 1/11	1/11 au 1/12	1/12 au 1/3	1/3 au 15/6	15/6 au 1/9
	0,65	0,70	0,45	0,15	0,20

Choix des indices C

J.M. Masson (1971), Heusch (1970) et le CTFT (1979) donnent différentes valeurs de l'indice C en zone méditerranéenne. Les tableaux donnant les origines des informations pour tous couverts de type méditerranéen sont reportés en **annexe 4**.

Dans le cadre de Zanfour, le choix d'indices pertinents nécessite quelques ajustements liés aux caractéristiques des assolements et des terres les supportant.

a) l'assolement de Zanfour est du type Céréale - Jachère. Pour cette sole, le coefficient médian C donné par J.M. Masson est de 0,40. Il doit être modulé en tenant compte de la vigueur des recrûs lors de la mise en jachère, vigueur liée autant à la fertilité chimique éventuelle qu'aux caractéristiques hydriques des sols permettant un allongement de la période de satisfaction des besoins en eau.

b) les mêmes caractéristiques des sols sont susceptibles de jouer aussi sur la vigueur des céréales donc d'améliorer ou de péjorer quelque peu l'indice de couverture C par rapport à sa valeur médiane. Lors de la prospection, on a constaté que certaines parcelles présentaient une densité de semis et un rendement potentiel nettement supérieurs à d'autres. On a tenu compte des résultats d'un travail antérieur (BV de El Hnach) pour moduler l'indice C = 0,40 de + ou - 30%, ce, pour rendre compte, à une période phénologique donnée, des diminutions ou améliorations de la protection du sol par les recouvrements.

. En considérant la carte pédologique, on a retenu finalement:

- Céréales + Jachères bien développées ---> C global sur les deux années = 0,30 sur les sols calcimagnésiques profonds sur marnes, isohumiques modaux, encroûtés ou vertiques, peu évolués non climatiques d'érosion lithosoliques,
- Céréales + Jachères bien développées ---> C global sur les deux années = 0,50 : sur toutes autres situations.

Le tableau VI présente la synthèse de cette recherche et les valeurs de C retenues pour le bassin versant de Zanfour

Tableau VI : Zanfour - indices C retenus pour végétaux "naturels" et "cultures annuelles"

Occupation	selon Wischmeier	selon Masson	selon Heusch	selon CTFT	selon calcul RUSLE Maroc	C retenus
Oliviers sol couvert 20%	0,180				0,104	0,180
Arboriculture sol couvert 20%	0,180	0,350	0,080	0,900		0,180
Parcours, jachère longue	0,150	0,200			0,098	0,150
Assolement C - J , bonne protection sol		0,400	0,240	0,400		0,300
Assolement C - J , mauvaise protection		0,400	0,240	0,400		0,500
Garrigue à Romarins H. 0,50m R. 25%	0,170					0,170
Garrigue claire H. 0,50m R. 15%	0,260				0,040	0,260
Forêt dense	0,015	0,010			0,014	0,010
Forêt claire	0,100	0,050				0,100
Affleurements de calcaires nus						0,050
Reboisement sur terre ripée	0,170	0,150				0,170
Lit d'oued						0,700

L' érodibilité des sols

Calculer l'érodibilité d'un sol consiste à évaluer sa propension à s'éroder du seul fait de ses caractéristiques intrinsèques, toutes autres causes d'érosion étant par ailleurs fixées (pente topographique, longueur de versant, protections végétales nulles, pratiques antiérosives nulles) les techniques culturales étant, quant à elles, choisies pour fragiliser le sol au maximum.

Une standardisation rigoureuse des conditions expérimentales a permis d'évaluer l'érodibilité des sols de milliers de parcelles du Middle Owest américain. Ce travail notoire est consigné dans les publications de Wischmeier, Smith, Uhland (1958) - Wischmeier (1959, 1960, 1972, 1974), Wischmeier, Smith (1960) et Wischmeier, Johnson, Cross (1971). Le succès des opérations réalisées sur le continent nord-américain fut tel que les premières équations de prévision des érosions furent qualifiées d'universelles par leurs auteurs. Son application en d'autres lieux et notamment à Hawaï, donc encore aux Etats-Unis (Dangler, Swaïfi et al. 1976) en Afrique de l'ouest (Roose, 1977) - (Collinet, 1988) ou en Afrique du nord (Nasri, 1990) a prouvé que ce qualificatif devait être abandonné pour revenir à plus de raison quant aux limites et conditions d'application de ce modèle.

Ceci étant, il apparaît que ce modèle statistique basé sur l'expérimentation reste intéressant pour toutes comparaisons des érosions dans un cadre morphologique et climatique donné, à la condition de rester en deçà d'une échelle d'application dans laquelle les lois de l'hydraulique imposées par la topographie et la physique des sols restent pertinentes. Cette remarque concerne essentiellement les effets d'un allongement du versant sur l'érosion. Pratiquement cette longueur est limitée à environ 300m:

- . en deçà, on reste dans le domaine d'une mobilisation des terres initiée par l'agressivité des pluies et poursuivie par une prise en charge des éléments détachés et simplement transportés,
- . au-delà, on passe aux domaines où, au mode érosif précédent, s'ajoute celui lié à l'abrasion d'un flux de ruissellement qui varie selon sa vitesse et la charge solide qu'il transporte.

Les caractéristiques pédologiques de stabilité sont celles qui favorisent une organisation des éléments du sol en structures construites, où, en l'absence d'organisation structurale, ce sont celles qui assurent la cohésion d'un ensemble d'éléments non organisés (ciments minéraux ou organiques par exemple).

Les données prises en compte dans le calcul de cette érodibilité rentrent dans des abaques (nomogramme) ou plus récemment dans des logiciels facilitant les différents calculs (RUSLE). Ces données sont extraites de la carte pédologique du bassin versant, elles ont trait à:

- la texture (A% et L + STF%),
- la teneur en matière organique,
- une appréciation sur le développement, la dimension et la géométrie des unités structurales,
- un classement des perméabilités selon 6 classes.

La fiche de terrain (modèle en **annexe 5**) a été conçue pour saisir un maximum d'informations en rapport avec le modèle. Certaines de ces informations sont modulées par les teneurs en éléments grossiers (limite 75mm de diamètre) lorsque ceux ci sont susceptibles d'interférer sur la perméabilité.

Si l'on trouve dans cette liste des éléments intervenant effectivement dans la stabilité de la structure donc sur la susceptibilité à la dispersion du matériau considéré, on ne trouve par contre pas d'informations sur la chimie ou la minéralogie des argiles, informations effectivement difficiles à évaluer sur le terrain mais importantes dès lors qu'il s'agit de caractériser:

- la solidité des ciments organiques ou minéraux assurant la cohésion du sol (rôles des cations et anions du complexe absorbant ou des solutés des solutions du sol),
- la dynamique structurale saisonnière liée à la présence d'argiles gonflantes.

D'autres modèles, plus récents et bâtis sur le même principe, tentent d'intégrer ces informations complémentaires. S'ils fournissent des diagnostics plus pointus, il n'est pas sûr qu'ils soient plus performants en ce qui concerne la fidélité des informations érosives fournies.

Le **tableau VII** montre un classement des érodibilités des sols des différentes zones climatiques des Etats Unis, y compris les Oxisols et Andisols d'Hawaï.

Les résultats sont exprimés en unités anglo-saxonnes (K u.s.) et en unités internationales (K si) avec $K_{s.i.} = 0.1317 K_{u.s.}$

Classes des érodibilités des sols "K"		
selon le SCS de l'USDA de 1973		
(cité par E.W.Dangler, S.A. El Swaïfi et al.,1976)		
	K usa	K si
Très basse	<0,100	<0.014
Basse	0.100 à 0.199	0.014 à 0.027
Moyenne basse	0.200 à 0.319	0.026 à 0.042
Moyenne haute	0.320 à 0.429	0.042 à 0.056
Haute	0.430 à 0.549	0.057 à 0.072
Très haute	> 0.550	> 0.073

Tableau VII: classement des érodibilités, à partir des travaux du Soil Conservation Service du Département de l'Agriculture des Etats Unis.

L'érosivité des pluies

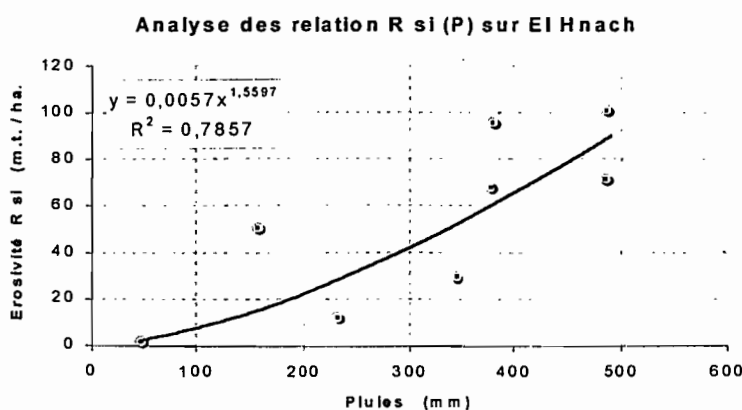
Comme le barrage est de construction récente, son bassin versant ne dispose pas encore d'un équipement pluviométrique suffisamment développé, ceci est en cours.

Pour caractériser l'agressivité des pluies il faut acquérir et traiter des hiétoigrammes assez précis pour obtenir, par averse, la ou les intensités maximales pendant 30 minutes (I_{30}) ou mieux, pendant 10 voire 5 minutes (I_{10} , I_5), ce que les pluviographes modernes permettent de faire.

Ne disposant pas pour le moment de données suffisantes sur le bassin de Zanfour, nous avons combiné:

a) les informations de la station pluviométrique de Dahmani (ex Ebba Ksour) : N 39°93'60" et E 07°21'50") qui est située à moins de 15 km du bassin, sur un site topographique permettant cette comparaison et qui dispose de 64 années de lectures de 1926 à 1990 (cf fig. 2 et 3),

Figure 8: analyse des relations Rsi (P) sur El Hnach



b) les informations sur l'agressivité des pluies du bassin versant de la retenue collinaire de El Hnach (N36°04'10" - E 09°26'55") située à 40 km de Zanfour et qui est la station la plus proche pouvant livrer cette information.

Dans un premier temps, une analyse des 64 années de précipitation sur Dahmani a permis de constater :

que sur ce laps de temps n'existait aucune périodicité (fig. 3),

que le maximum maximum correspondait aux évènements de 1972,

que l'on pouvait donc extraire de cette période une valeur médiane, puis un maximum et un minimum.

Tableau IX: Pluviométrie et érosivité sur la station de Dahmani

Dans un second temps, une analyse des relations entre érosivités et hauteurs de pluies sur El Hnach a permis d'évaluer, sur Dahmani (fig.8) les agressivités annuelles des précipitations de cette station pour une médiane pluviométrique et pour les pluviométries limites maximales et minimales d'occurrences cinquantennaires (tableau IX). Cette procédure est évidemment critiquable puisqu'elle suppose deux choses: (i) une seule averse sur la totalité d'un bassin versant de quelque 50km², (ii) une homogénéité des caractéristiques énergétiques des pluies sur une assez vaste zone de cette dorsale tunisienne ce qui n'est probablement pas exact. Elle n'est que provisoire et pourra être facilement révisée dès qu'un effectif suffisant de données "sortira " du bassin de Zanfour.

Station de DAHMANI	Pluviométries annuelles (mm)	Erosivités annuelles R si (mètre.ton./ha.heure)
Valeurs maximales (1972)	909	165
Valeurs médianes (1980)	431	76
Valeurs minimales (1945)	267	45

RESULTATS , COMMENTAIRES

Les résultats se présentent sous les formes :

- de différentes couches d'informations sur les caractéristiques physiques et anthropiques provenant du traitement des données du terrain,
- de produits finaux qui sont les synthèses cartographiques générées par le fonctionnement d'un système d'information géographique (Arc View) utilisant les indices calculés par le modèle RUSLE.

Ce système est dynamique, il peut répondre à différentes requêtes, soit en introduisant des situations et des événements correspondant à l'évolution réelle, annuelle du système, soit en simulant des situations dans le but de suivre les effets d'une amélioration dans la conservation du bassin ou de tester sa résistance à de possibles contraintes.

Les différentes "couches" d'informations

Chaque couche d'information a, le plus souvent, pour support une carte qui informe sur des facteurs d'iso-risques ou d'iso-protections. Ces cartes présentent les différents indices R, K, SL, C et P classés selon des seuils ou des valeurs médianes, ce, selon la nature des paramètres représentés.

Si les manifestations des dynamiques érosives du domaine circum-méditerranéen n'ont pas les mêmes intensités que celles issues de la zone tempérée, nord-européenne par exemple, les indices qui les représentent sont obtenus partout selon les mêmes principes, aussi peut-on les ordonner pour une appréciation croissante ou décroissante des risques qu'ils définissent ; c'est, par exemple, le cas des classes d'érodibilité K du tableau VII.

Les cartes des indices sont des produits transformés de documents cartographiques préliminaires à partir desquels se trient et se simplifient les informations nécessaires et suffisantes à la création de ces cartes d'indices.

Exemple de l'établissement de la carte des indices d'érodibilité K

Carte et légende des sols (en annexes 7 et 8) ---> calcul des indices K au sein de chaque unité pédologique inventoriée ---> établissement d'une loi de classement de ces indices ---> regroupement de certaines unités pédologiques possédant le même indice ---> création de la carte des indices K.

Exemple de l'établissement de la carte des indices topographiques SL

Mesure des pentes dans les unités paysagiques représentatives sur carte topographique ou par photo-interprétation ---> carte des pentes (en annexe 9) ---> à partir des données « longueur » et « inclinaisons », calcul (tableur) de l'indice topographique SL ---> création de la carte des indices SL

Exemple de l'établissement de la carte des indices de couverts végétaux et techniques culturales C

Identification des couverts et des techniques culturales sur le terrain et par photo-interprétation, distinction des formations pérennes et annuelles ----> carte des occupations actuelles des sols (en annexe 10) ----> choix des indices pertinents, prise en compte de la structure végétale, prise en compte, ou non, des évolutions saisonnières ----> calcul des indices C ----> création de la carte des indices de couverts végétaux et techniques culturales C

Exemple de l'établissement de la carte des indices des pratiques antiérosives P

Identification des pratiques, de leur efficacité, de leur géométrie ----> cartes des aménagements de C E S (en annexe 11) ----> choix des indices pertinents ----> calcul de ces indices P ----> création de la carte des indices pratiques antiérosives P

L'érosivité des pluies, les indices R si

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, nous ne disposons pas encore d'informations permettant de dresser une carte des isohyètes sur le bassin versant de Zanfour et donc d'en calculer puis représenter de proche en proche les érosivités des pluies. Pour faire néanmoins fonctionner le système nous nous sommes limités à trois érosivités annuelles : une médiane de 76 points, une exceptionnellement très forte de 165 points, une exceptionnellement faible de 45 points.

L'érodibilité des sols, carte de l'indice K si

Les indices de la légende de cette carte ont été calculés à partir des observations de terrain, à l'aide du modèle R U S L E Maroc (annexe 6) ; ils présentent une distribution bimodale:

- un premier pic à 10% de fréquence de K_{si} , de 0,006 à 0,014 ce qui correspond à des érodibilités très basses,
- un second pic à 40% de fréquence de K_{si} à 0.026 ce qui correspond à des érodibilités moyennes plutôt basses
- les érodibilités fortes et très fortes , $K_{si} > 0.058$ couvrent 13% du bassin ; vers l'aval les sols présentant ces risques se situent à moins de 3 km du lac, ce sont malheureusement les sols proches des berges donc susceptibles de fournir le plus directement des sédiments.

La carte pédologique, sa légende (annexes 7 et 8) et le tableau X ci après donnent une première idée des susceptibilités à l'érosion des différentes unités des sols inventoriées et permet leur classement par fragilités croissantes.

Tableau X: unités de sols du bassin de Zanfour classées selon leurs érodibilités

Classe de Ksi	érodibilités médianes	unités cartographiques	contenu sol des unités
1	0.0020	1	SMBNC(i) d'érosion, lithosoliques sur roches dures
2	0.0060	3	SMBNC d'érosion, lithosoliques avec épandage EG sur roche dure
3	0.0140	8	Calcimagnésiques carbonatés et bruns calciques profonds sur marnes dominantes
4	0.0170	7	Isohumiques modaux, encroûtés ou vertiques
5	0.0260	4, 9, 10	SPENC(i) d'érosion lithiques sur roches dures + Rendzines + Calcimagnésiques profonds sur calcaire + Calcimagnésiques profonds sur colluvions marno-calcaires et alluvions
6	0.0315	5	SPENC d'érosion ou d'apport avec épandages d'EG sur roches dures
7	0.0580	6	SPENC d'érosion régosoliques sur marnes dominantes
8	0.1150	2	SMBNC d'érosion, régosoliques sur bancs marneux.

(i) SMBNC = sols minéraux bruts non climatiques (cf. carte pédologique et sa légende en annexe), SPENC = sols peu évolués non climatiques.

Les sols les plus résistants avec des Ksi de 0.0020 à 0.0140 sont:

- soit des sols peu épais, souvent riches en éléments grossiers sur bancs calcaires ou croûte calcaire dure (uc 1 et 3) sur pentes et qui ne sont pas érodibles parcequ'ils ne sont plus érodibles, n'ayant plus de matériau meuble à perdre.

- soit des sols profonds différenciés sur marnes: il faut alors voir dans cette plus forte résistance un effet de leur forte infiltrabilité, elle-même liée soit à une très bonne structuration superficielle se reconstruisant par dessiccation après les épisodes pluvieux, soit, sur jachères longues, au réseau de fissures larges et profondes parcourant ces sols.

Les sols les plus fragiles avec des Ksi de 0.0315 à plus de 0.1150 sont:

- des sols peu évolués faiblement profonds sur pente, sur roche dure et qui, sans protection végétale, ont encore des matériaux meubles à perdre (uc 5),

- des sols peu évolués moyennement profonds de pente sur bancs marneux non encore ravinés (uc6)

- des affleurements de bancs de marnes et argilites en cours de ravinement sur versant ou en vallée et constituant alors les berges de l'oued Zanfour et de ses principaux affluents (uc2)

La topographie, carte de l'indice S L

La carte des indices topographiques SL reproduit la morphologie, quantifie les risques liés à la vigueur du modelé, elle intègre aussi les effets de l'irrégularité des versants.

La légende de la carte des indices SL montre une distribution bimodale :

- un mode large pour des SL de 3 à 7 regroupant 60% des observations c'est-à-dire , en gros, pour des pentes de 10 à 20% sur 100m consécutifs de versant,

- un mode étroit pour des SL de 12,5 regroupant 25% des observations c'est-à-dire pour des pentes de 40% sur 100m consécutifs;

- on repère enfin les deux massifs escarpés des Dj. Zaoura en rive gauche amont et El Krezara de l'extrême amont du bassin avec des indices SL de 22,5 ce qui signifie que des portions de versant atteignent et dépassent les 100% de pente.

Ces distributions renseignent sur la vulnérabilité topographique de quelques zones du bassin:

- deux zones ondulées sont peu vulnérables: (i) un domaine aval avec des SL < 5 correspondant aux encroûtements du Quaternaire, (ii) la zone déprimée amont qui est ceinturée par un système de failles SO-NE, et qui fut signalée dans le paragraphe "géologie, géomorphologie"

- deux zones accidentées à forte vulnérabilité topographique avec des indices SL > 9: (i) en amont du bassin avec le Djebel Bel Hassen , (ii) un domaine du moyen amont au moyen aval correspondant, en rive droite, aux bancs et corniches calcaires campaniennes et, sur les deux versants, aux dénivelées occasionnées par les puissants ravinements des séries du Santonien.

A l'intérieur de ces zones, les informations fournies par SL couvrent les effets de la pente et de la longueur de segments à pentes constantes. Les effets, pas toujours univoques, qu'ont ces deux paramètres sur le ruissellement et sur l'érosion et aussi la complexité des relations entre ruissellements et érosions eux-mêmes nécessitent le court développement un peu plus théorique qui suit et qui peut trouver son utilité pour aider à préconiser les techniques de CES les mieux adaptées.

Problème de la régularité du versant

Pour une inclinaison de versant donnée, une pente concave provoque des sédimentations là où le flux de ruissellement perd sa compétence puisque sa vitesse diminue proportionnellement à la diminution de l'inclinaison du segment de versant aval ; la relation la plus connue entre la vitesse du flux et la pente étant du type:

$$\text{vitesse du flux} = k \cdot \text{pente}^{0,5}$$

La relation pente / érosion a , quant à elle, été étudiée depuis longtemps (Zingg , 1940 - Borst et Woodburn, 1949 - Heusch, 1970 - Hudson, 1973), elle est souvent de la forme

$$\text{érosion} = k \cdot \text{pente}^a$$

l'exposant "a" variant de 1,5 à 2 selon les auteurs ; cette importante variation s'explique parce qu'il est difficile de maîtriser tous les facteurs expérimentaux (nature du sol, modalité de l'érosion, rugosité liée aux facteurs précédents etc..) pour isoler le seul effet « pente ».

Sur pente convexe; c'est différent, la compétence du ruissellement augmente avec la longueur de versant par augmentation de sa vitesse à cause de la convexité, la capacité de transport augmentant on n'aura, en principe, aucun dépôt sur ce type de versant.

Problème de la longueur du versant

L'influence de la longueur du versant sur l'érosion est également complexe. Les réponses sont différentes selon les auteurs et selon les expérimentations pratiquées dont il faut bien dire qu'aucune n'est strictement comparable.

Sur une pente constante, et surtout sur un sol qui aurait la même érodibilité et une infiltrabilité constante de l'amont vers l'aval, la lame ruissellée doit augmenter avec l'allongement du versant puisque celle-ci s'enrichit du cumul de tous les refus d'infiltration lors de son transit.

Dans ces conditions, l'intensité du flux augmentant, sa capacité de transport et sa capacité érosive devraient elles-mêmes augmenter donc, logiquement, l'érosion augmenterait avec l'allongement du versant.

Combinaison inclinaison et longueur de versant

Selon les développements théoriques précédents, tout concourt à ce que l'érosion augmente avec la pente et avec la longueur du versant.

La pratique montre, d'une part, que la dissociation des effets pente et longueur est souvent difficile, d'autre part, que si l'effet de l'inclinaison du versant sur une augmentation de l'érosion est le plus souvent vérifié, l'effet longueur de versant l'est moins souvent parce que la différenciation toposéquentielle des sols aboutit souvent à faire varier leurs infiltrabilités de telle sorte que cet effet théorique est annihilé.

L'occupation des sols, l'indice C

La carte des indices C discrimine, en gros, deux domaines séparés par un indice $C = 0,5$.

$C > 0,5$

Au-dessus de 0,5, les formations végétales sont absentes, ou alors leur développement intervient peu et de façon trop peu permanente sur la protection des terres, une comparaison de ces indices avec la carte d'occupation du sol (**annexe 10**) montre que ce domaine recouvre effectivement : (i) celui des sols nus et affleurements calcaires (roches ou croûtes), (ii) le lit de l'oued Zanfou et de ses principaux affluents, (iii) les berges à vif des ravins, surfaces particulièrement développées dans le cour moyen aval sur les marnes du Santonien, (iv) les associations biennales céréales-jachères croissant sur des sols peu fertiles (**tabl. VI**).

$C < 0,5$

En dessous de 0,5, il y a effet protecteur mais on découvre alors une distribution bimodale avec:

_ un premier mode regroupant les domaines à forte protection assurée essentiellement par (i) les forêts denses sur 20% du bassin ($C < 0,01$), (ii) la forêt claire sur 7% du bassin ($C = 0,10$),

_ un second mode regroupe des formations occupant 40% du bassin avec celles assurant une assez bonne protection, ce sont: (i) les 29% du bassin avec l'association biennale céréales + jachères croissant sur des sols fertiles ($C = 0,30$), (ii) les 11% de garrigues claires ($C \# 0,26$), (iii) les 4% d'arboriculture et les 6% de garrigues denses ($C \# 0,18$).

Les travaux de C E S, l'indice P

Des travaux de C E S ont été identifiés sur environ 20% du bassin versant, cette proportion doit probablement être revue à la hausse car la totalité des corrections de torrent et ravines n'a probablement pas pu être totalement comptabilisée.

La carte des aménagements de CES signale:

- 13% de banquettes de terres dites amorties lorsque le canal est comblé jusqu'à environ 0,50m de la crête du bourrelet de terre... ceci prouve la très bonne efficacité de ces ouvrages qui réduisent de 10 fois l'érosion sur versant ($P = 0,1$),

- 6% de cordons de pierres dans les parcours de la partie amont en rive gauche, réduction de l'érosion 65% ($P = 0,35$).

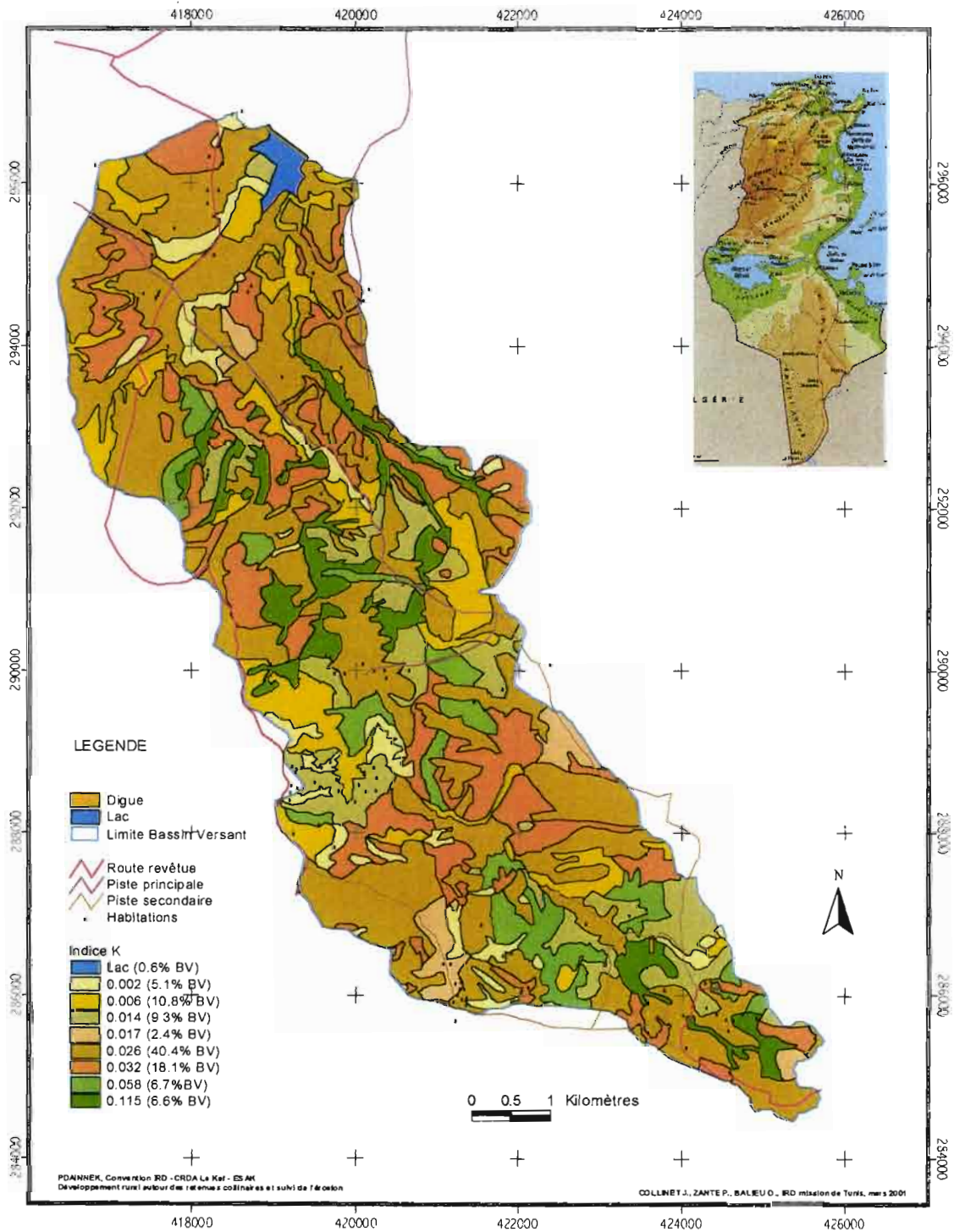
- 1,3% de ripages des croûtes calcaires pour les reboisements, réduction de l'érosion de 40% ($P = 0,60$),

- 0,7% d'ados en aval du bassin, réduction de 55% de l'érosion ($P = 0,45$)

CARTES DES INDICES CALCULES

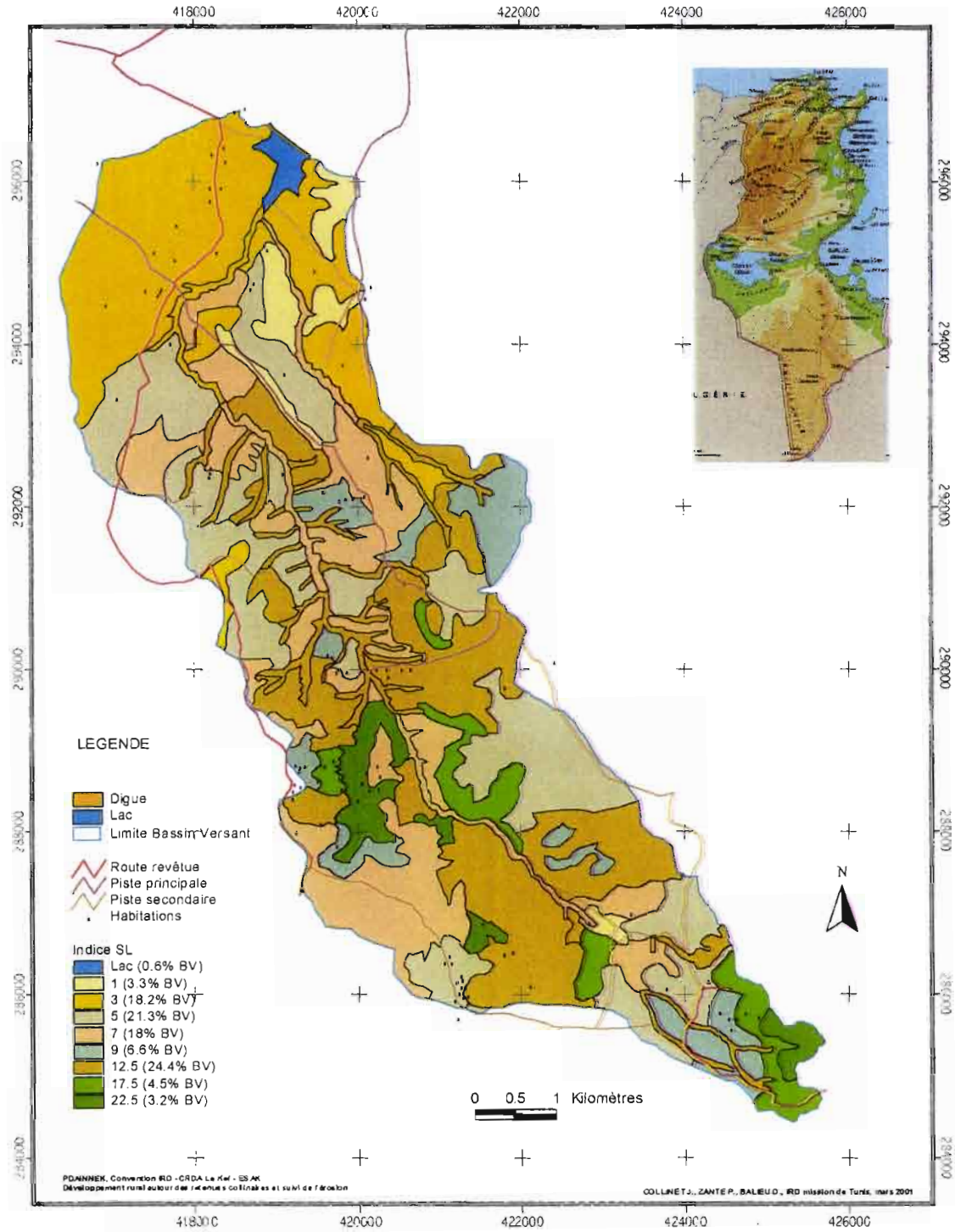
BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

Carte de l'indice K



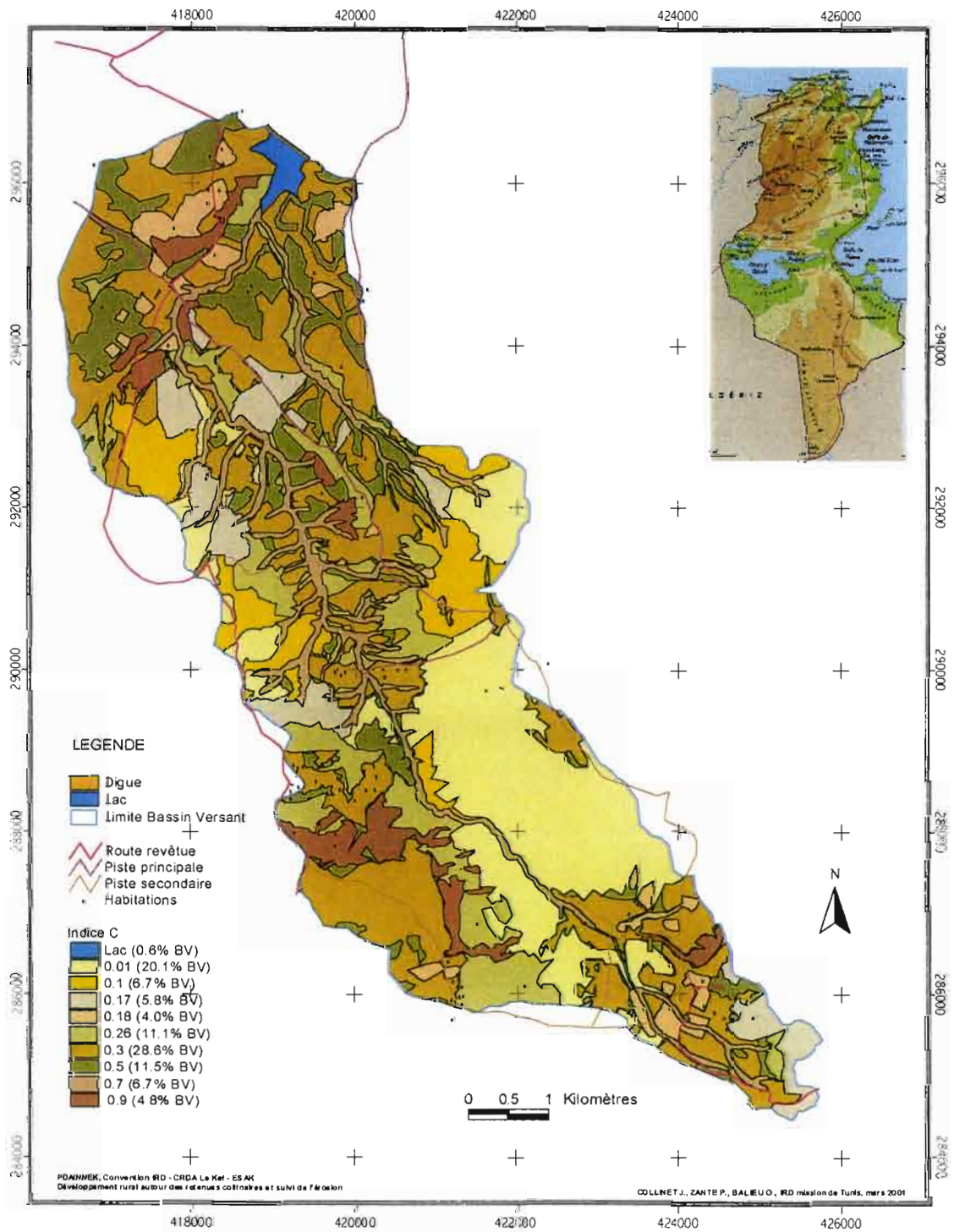
BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

Carte de l'indice SL



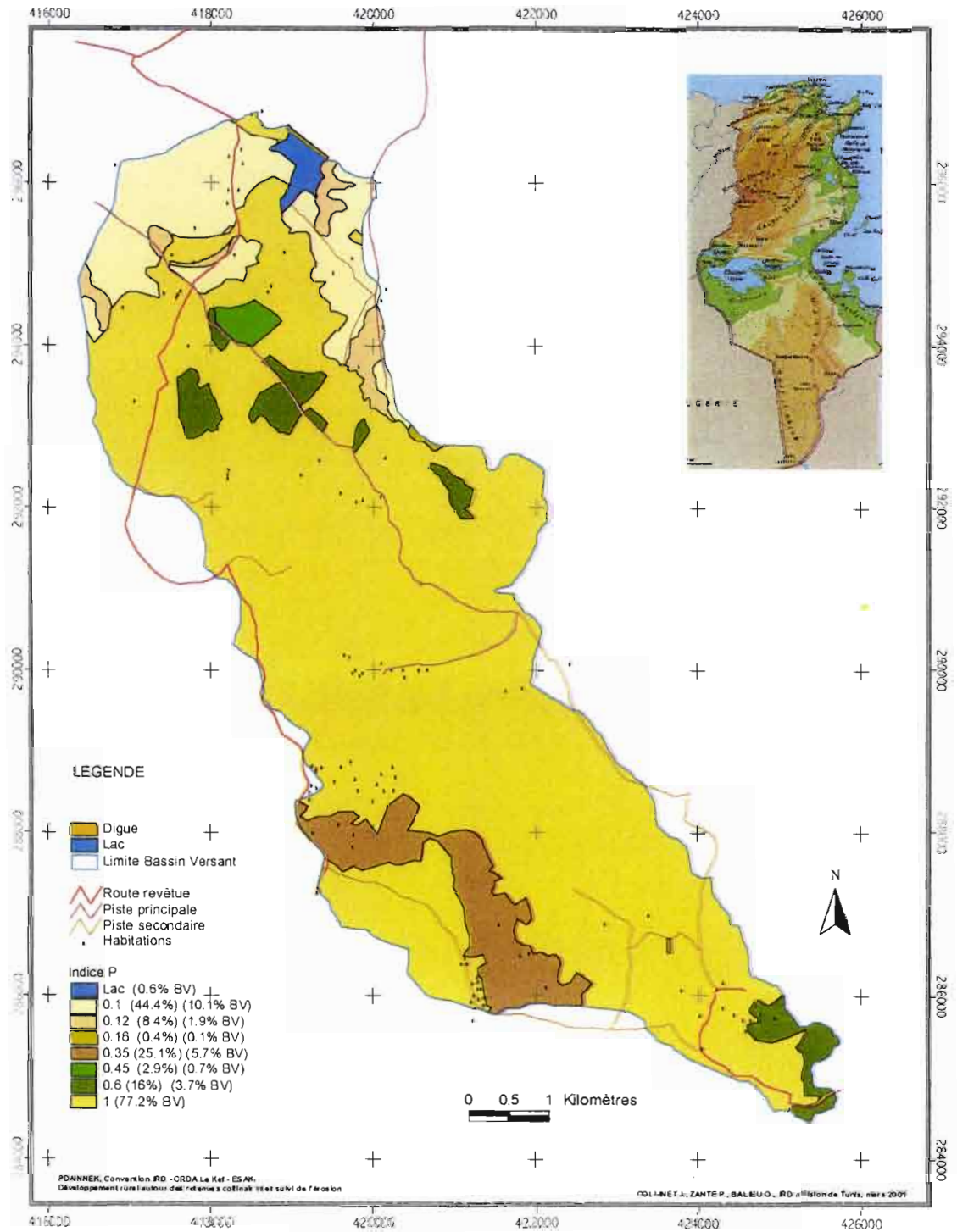
BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

Carte de l'indice C



BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

Carte de l'indice P



Synthèse: les cartes de susceptibilité à l'érosion

Les cartes de susceptibilité à l'érosion représentent des exemples de prévisions de risques érosifs exprimés selon la formule $E = R_{si} \cdot K \cdot SL \cdot C \cdot P$. avec trois exemples d'érosivités annuelles, ce sont:

- a) pluie d'occurrence annuelle: $P = 431\text{mm}$ d'où une érosivité R_{si} de 76 points ,
- b) pluie forte d'occurrence cinquantenaire: $P = 909\text{mm}$ d'où une érosivité R_{si} de 165 points ,
- c) pluie faible d'occurrence cinquantenaire : $P = 267\text{mm}$ d'où une érosivité R_{si} de 45 points

Signification des érosions calculées: de la mobilisation initiale des terres à l'érosion globale

Le fonctionnement du modèle donne une information qu'il convient de circonscrire aux limites suivantes:

- il informe sur la mobilisation des terres cultivées, ou non cultivées, sous les effets des énergies cinétiques de pluies, c'est le premier stade de l'érosion qui est une mobilisation initiale des éléments,
- il informe sur la prise en charge des éléments détachés par un flux de ruissellement et sur leurs transferts, ou leurs dépôts sur un segment homogène de versant n'excédant pas 300m de longueur,
- il informe sur une partie de l'abrasion linéaire, en rigoles, c'est-à-dire sur des risques d'incision ne dépassant pas 10cm de profondeur,
- il n'informe pas sur les pertes en terres liées aux mouvements de masses (FAO, 1994),
- il n'informe pas sur les pertes en terres liées aux effondrements de berges de l'oued et de ses principaux affluents.
- il ne peut pas non plus donner d'informations sur le bilan "exportations / dépôts" de sédiments au-delà de 300m de segment homogène de versant, ceci , a fortiori, pour les transferts sur fond de lit de l'oued des sédiments provenant de l'amont.

Ce modèle calcule donc les pertes provenant de versants non ou peu sujets au ravinement.

Cependant , il applique aux ravineaux et ravins les fonctionnements énoncés précédemment, cela signifie que leurs berges et leurs lits sont traités comme des versants d'ordre "n""n-1", etc.. produisant des sédiments par les seuls effets des énergies des pluies et des abrasions en nappe ou des abrasions linéaires faiblement canalisées sur quelques centaines de mètres. Le modèle ne peut par contre pas considérer la capacité abrasive et la capacité de transport d'un flux profond canalisé dans des drains plus importants que des rigoles.

Tableau XI: Zanfour, érosions pondérées et érosions globales

Class. érosions (moyennes t/ha/an)	Surfaces correspondantes			Erosions pondérées par les superficies et érosions globales		
	P faible R45	P médiane R76	P forte R165	P faible R45	P médiane R76	P forte R165
0,5	52,5	45,3	34,2	1128,8	974,0	735,3
2,5	33	28,1	21,1	3547,5	3020,8	2268,3
7,5	9,2	17,3	25,5	2967,0	5579,3	8223,8
17,5	2,2	4,5	10	1655,5	3386,3	7525,0
35	3	2,2	4,2	4515,0	3311,0	6321,0
63	0	2,6	1,3	0	7043,4	3521,7
104	0	0	1,2	0	0	5366,4
204	0	0	2,4	0	0	21052,8
	somme tonnes / BV / an			13813	23314	55014
	t. / ha / an			3,21	5,42	12,79
	m ³ / ha / an			2,14	3,61	8,52

Il résulte de ce qui précède que les prévisions d'érosions de versants, calculées pour les années de faibles voire de moyennes agressivités de pluies, sont une approche correcte de la réalité. Par contre, celles calculées pour les années exceptionnellement agressives doivent être considérées comme un minimum minimorum des risques érosifs. (tableau XI)

Les pondérations successives des érosions par superficies érodibles donnent finalement les pertes spécifiques suivantes, tous sols confondus, pour le bassin versant de Zanfour:

année peu aggressive:	$E = 3,21 \text{ t/ha/an}$, soit $2,14 \text{ m}^3\text{/ha/an}$
année moyenne:	$E = 5,42 \text{ t/ha/an}$, soit $3,61 \text{ m}^3\text{/ha/an}$
année agressive:	$E = 12,79 \text{ t/ha/an}$, soit $8,52 \text{ m}^3\text{/ha/an}$

Analyse des cartes

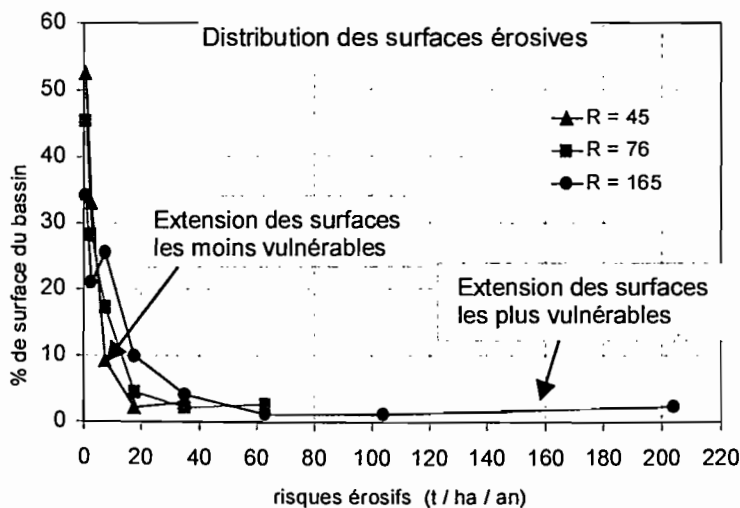
L'observation des cartes de susceptibilité à l'érosion fait ressortir quatre choses:

a) toutes les cartes montrent un effet protecteur remarquable des étendues forestées en moyen amont et en rive droite, là, les érosions n'excédant pas 1 t / ha / an et ce, quelle que soit l'érosivité (R de 45 à 165), et pourtant cette zone est caractérisée par des indices SL élevés signalant une forte vulnérabilité topographique.

b) l'effet protecteur des banquettes de l'aval mérite également d'être signalé: comme précédemment ce dispositif protège correctement les versants même pour de fortes agressivités de pluies mais il est vrai que l'on se situe là vers des modelés moins vigoureux qu'à l'amont ce qui est signalé par des indices SL nettement plus faibles,

c) le réseau des ravineaux et ravins incisant les versants et entaillant les berges apparaît très nettement sur les cartes dès les faibles agressivités des pluies (R45) vers le cours moyen avec des unités isoérosives de quelque $24 \text{ à } 46 \text{ t / ha / an}$, ce qui est considérable ; il y a à cela deux raisons: (i) zones très déclives (fort indice SL), (ii) affleurements de marnes et argilites qui sont très érodibles ($K_{si} \# 0,1$).

Le fait que les zones vulnérables soient situées, à quelques exceptions près, à proximité de drains (oued Zanfour où affluents principaux) pose un sérieux problème de conservation. En effet, les éléments mobilisés, de granulométrie fine (limons) sont exportés rapidement et avec une compétence de flux importante : les conditions de dépôts sur les versants ne sont donc pas réunies.



Il faut ici attirer l'attention sur le fait que les sols profonds, différenciés à partir de ces marnes et argilites, qui constituent l'unité cartographique pédologique n° 8 (cf ces UC en annexes 7 et 8), ont des érodibilités dix fois moindres ($K_{si} \# 0,01$) que les affleurements de leurs matériaux originels (UC2 et 6) pour des raisons qui ont été expliquées précédemment : il convient donc de ne pas confondre le comportement des matériaux originels avec celui des sols qui en sont issus.

Figure 9: Distribution des superficies pour différentes classes d'érosion

d) enfin, la comparaison des trois cartes montre que l'augmentation de l'érosion globale avec l'augmentation de l'érosivité se produit autant par extension des surfaces les plus vulnérables que par celle des surfaces peu vulnérables (fig. 9).

Simulation

Le couplage du modèle R U S L E et du S I G Arc View permet aussi de simuler des situations en modifiant les paramètres sur lesquels on peut agir: occupations de sols et techniques de CES, par exemple. L'intérêt réside dans la prévisions d'accroissements de protections possibles dans les limites de contingences telles que la topographie, le coût de nouvelles mesures de CES, etc..

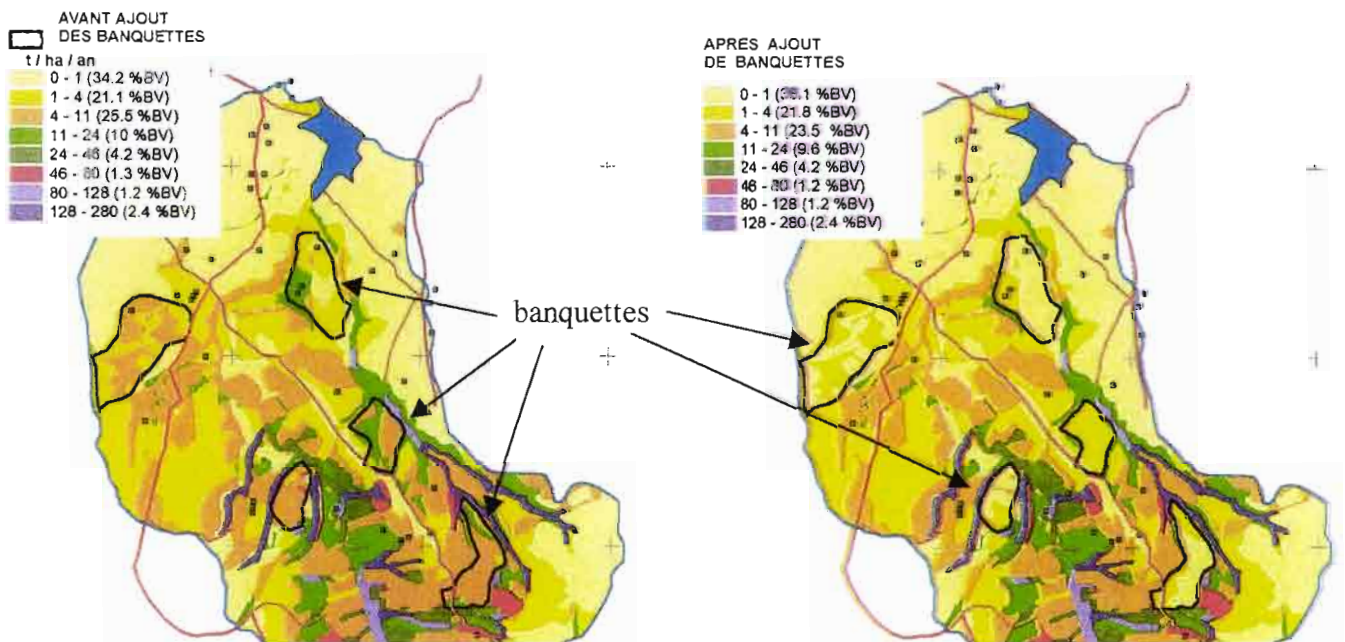


Figure 10: Simulation d'un ajout de banquettes sur cinq sites de l'aval du bassin, conséquences sur l'érosion.

Ceci peut concerner des installations de nouvelles banquettes (c'est notre exemple), des prévisions d'améliorations introduite par divers stades de reforestation, etc..On peut aussi, à l'inverse, prévoir les risques encourus par des dégradations provoquées ou naturelles.

Tableau XII: Simulation d'un ajout de banquettes sur cinq sites de l'aval du bassin, conséquence sur l'érosion.

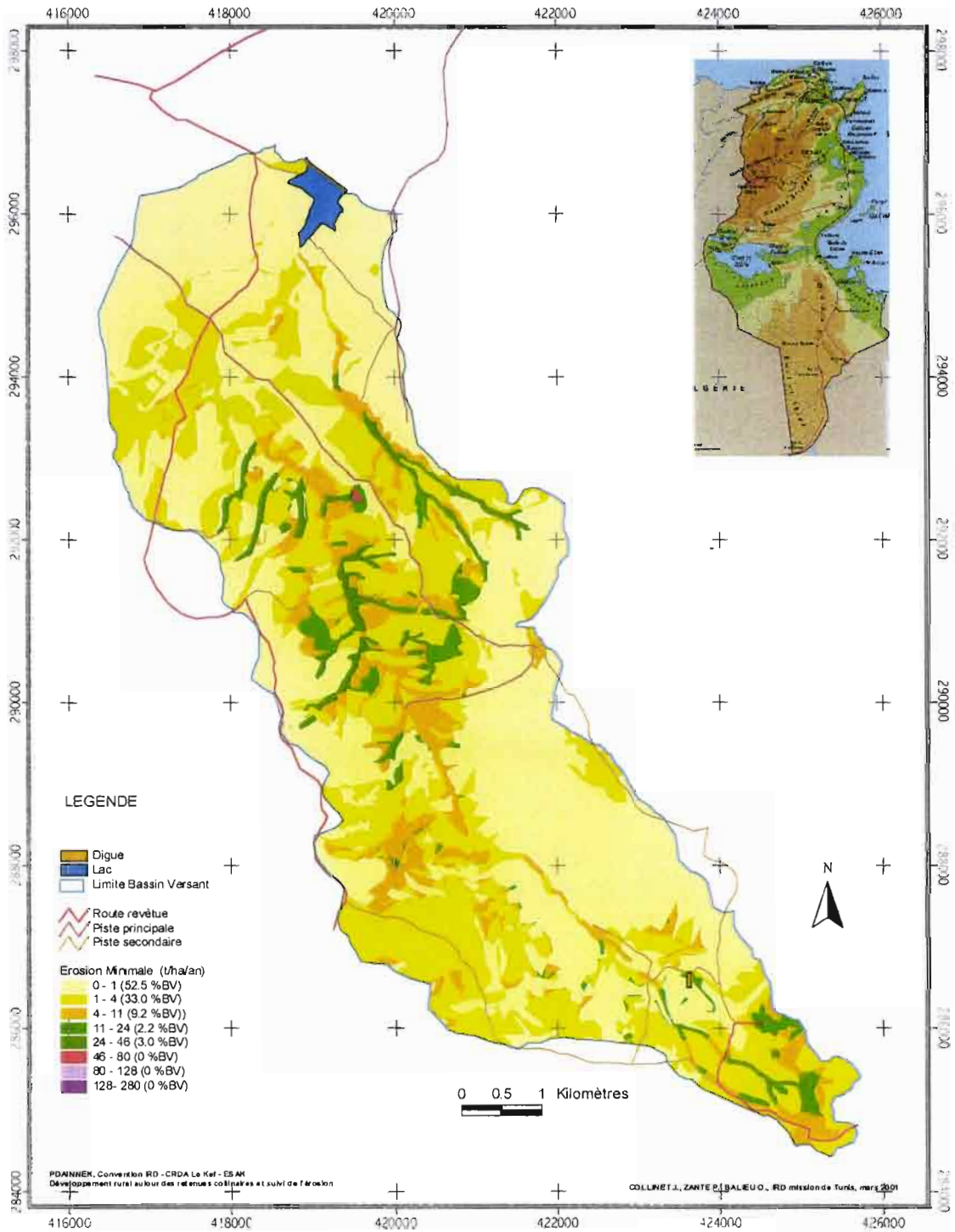
Classement des érosions t / ha / an	surface cinq zones		pertes en terres		
	avant %	après %	avant tonnes	après tonnes	différence tonnes
0,5	4.8	50.3	4.5	46.8	+42.3
2,5	31.4	47.8	146.0	222.3	+76.3
7,5	49.8	0.7	694.7	9.8	-684.9
17,5	12.1	0.6	393.8	19.5	-374.3
35	0	0.5	0	32.5	+32.5
63	0.7	0	82.0	0	-82.0
104	0.6	0	116.0	0	-116.0
204	0.5	0	189.7	0	-189.7
			différence = - 1295,8 tonnes		
Soit une diminution, toutes classes confondues, de -1295,8 tonnes, soit en moyenne, - 6.97 t / ha / an sur les cinq zones traitées qui représentent 186ha., et dans le cas d'une érosivité R maximum de 165 points. (cette diminution, reportée à l'ensemble du B V (4300ha) représenterait - 0, 30 t / ha / an , ce, toujours dans le cas d'une érosivité maximum R de 165 points)					

Les deux extraits de cartes de la **figure 10** et le **tableau XII** ci contre montrent ce qu'il adviendrait si l'on ajoutait des banquettes de terres dans cinq zones non encore protégées et où la topographie permettrait de le faire. On constate que la simulation de cet ajout de banquettes sur ces cinq zones se traduirait par une diminution spécifique de près de - 7 t / ha / an. Si cette diminution est très sensible localement, elle a aussi une conséquence non négligeable si ses effets sont rapportés à l'ensemble du bassin (-0,30 t / ha / an).

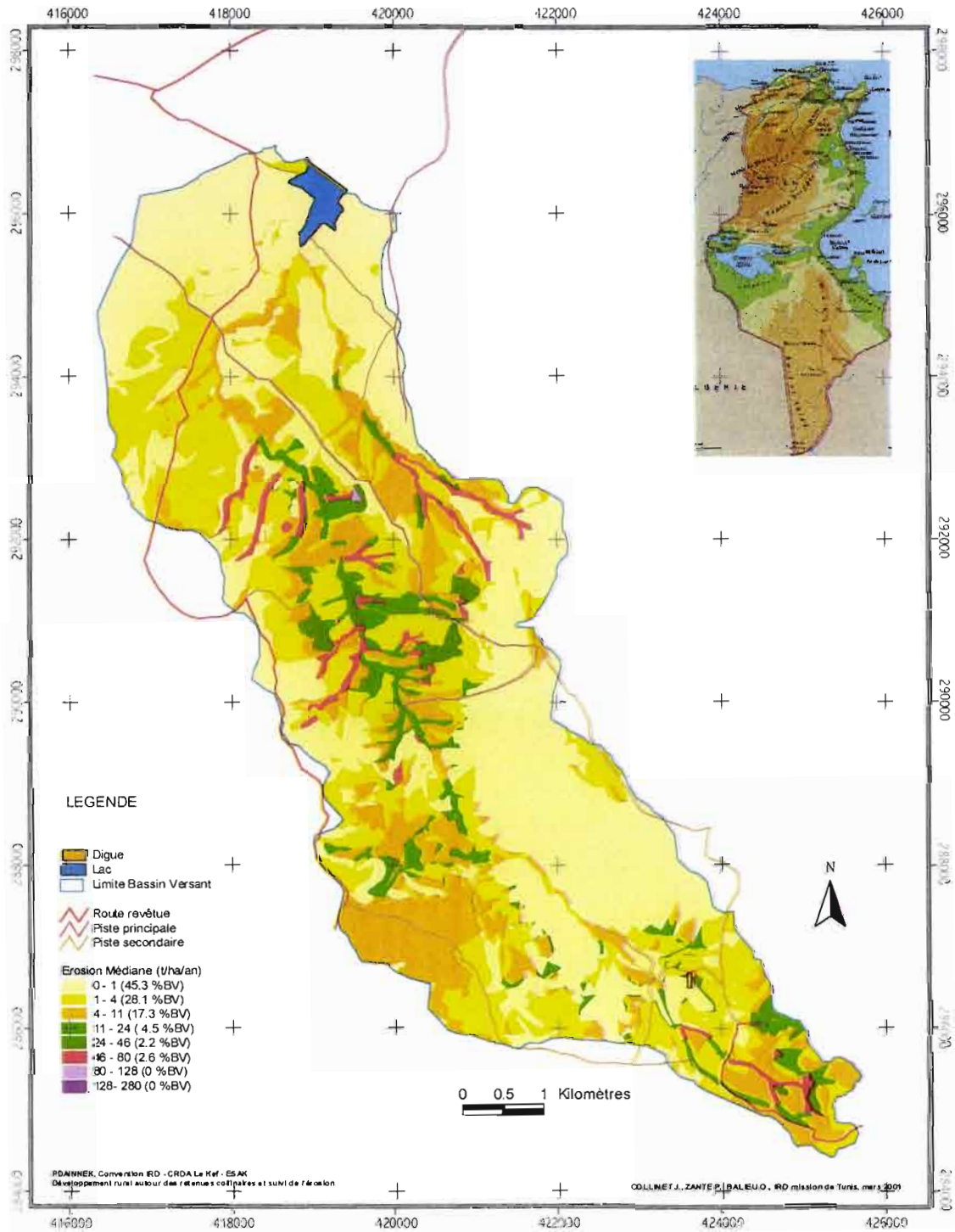
CARTES DE SUSCEPTIBILITE A L'EROSION

BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

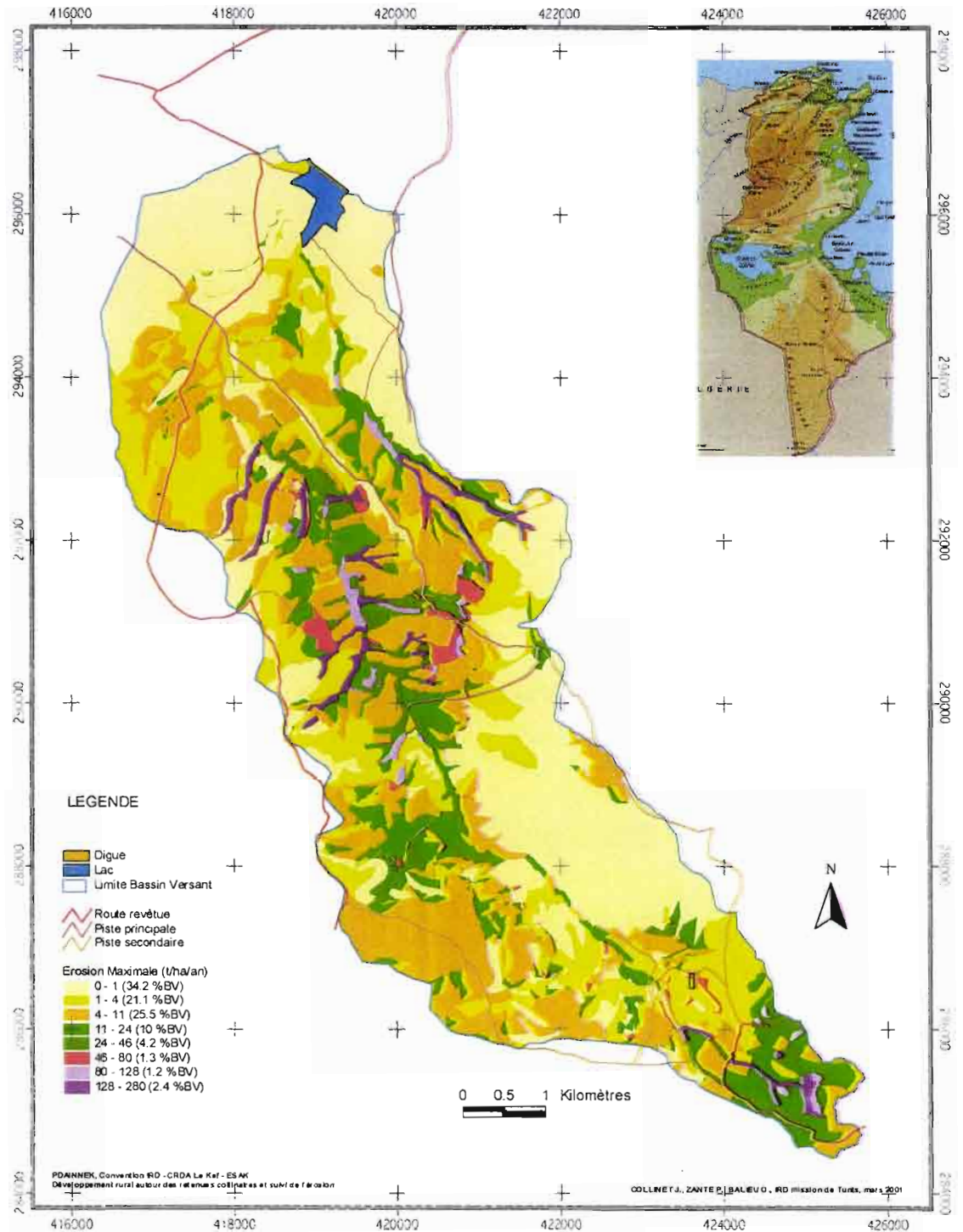
Carte de susceptibilité à l'érosion (R= 45 m.t/ha.h)



BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR
 Carte de susceptibilité à l'érosion (R= 76 m.t/ha.h)



BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR
 Carte de susceptibilité à l'érosion (R= 165 m.t/ha.h)



CONCLUSION

Ce travail est destiné à aider les preneurs de décisions pour l'évaluation des potentialités et contraintes du bassin versant de Zanfour. Ce bassin, de 43 km², équipé d'un barrage collinaire d'une capacité de 2.600.000m³, est situé dans la zone semi-aride du versant nord de la dorsale tunisienne.

Parmi les marqueurs permettant d'évaluer ces potentialités et contraintes, nous avons retenu les risques érosifs caractérisés dans un modèle de prévision de l'érosion, information ensuite spatialisée à l'aide d'un système d'information géographique. Différents relevés de terrain ont permis de dresser des documents caractérisant la physique du bassin et son utilisation par l'homme, ces données ont ensuite servi à construire des cartes constituant autant de "couches" d'informations sur les paramètres utiles au calcul de l'érosion. Le produit final est un ensemble de cartes dont trois sont une représentation des risques érosifs pour trois scénarios correspondant à des agressivités de pluies d'occurrences annuelles, cinquantenaires faibles et cinquantenaires fortes.

En année normale (P = 431mm), et dans les limites d'une méthode dont nous avons précisé la pertinence, le bassin versant de Zanfour présente une assez faible susceptibilité à l'érosion avec des pertes spécifiques de quelque 5 t / ha / an provenant de 90 % de la superficie du bassin soumis à une érosion simplement aréolaire et 10% du bassin à une érosion linéaire (rigoles et ravineaux). Cette appréciation sur l'intensité de l'érosion du bassin se fonde sur les résultats de levés bathymétriques effectués par nos collègues hydrologues sur les sédiments d'autres bassins versants étudiés dans le cadre d'autres contrats. Elle donnerait à Zanfour une durée de vie dépassant les 40 années.

En année exceptionnellement agressive (P = 909mm), et compte tenu du fait que, dans ce cas extrême, la méthode ne peut donner qu'une information sur les risques minimum encourus, l'érosion spécifique atteint les 13 t / ha / an. A cette érosion qui devient "sensible", doivent s'ajouter des pertes en terre liées aux érosions linéaires fortes (ravineaux et ravins) et aux éventuels mouvements de masses. L'érosion ravinaire couvre cette fois 20% de la superficie du bassin; là où elle sévit, il faut craindre des pertes spécifiques > 200t / ha / an. sur quelques hectares.

Ce travail a aussi été l'occasion de rappeler et démontrer, si cela était encore nécessaire, que les zones bien protégées par des couverts végétaux pérennes, (forêts, garrigues denses), s'érodent très peu : (i) parce qu'il n'y a pas de mobilisation d'éléments érodibles au niveau d'un sol même peu profond mais encore efficacement protégé par des jeunes recrûs et une épaisse litière de débris végétaux, (ii) parce que ces quelques décimètres de litière + sols maintenus intacts sont susceptibles de stocker assez d'eau pour retarder fortement l'apparition des ruissellements. Une analyse des cartes montre que ces couverts relativement intacts, situés en amont des versants, limitent fortement les risques de ravinement en aval.

La dégradation par surpâturage de ces sous-bois et litières des forêts et garrigues claires entraîne, en quelques dizaines d'années, la disparition des sols avec, sur calcaire, la mise en affleurement de la dalle rocheuse imperméable. Après un paroxysme érosif sur quelques décades, ces zones deviennent peu érodibles puisqu'il n'y a plus de sols mais elles se mettent aussi rapidement à fonctionner en impluvium, donnant, aux moindres averses, des ruissellements importants dévalant vers l'aval avec des eaux d'autant plus abrasives qu'elles sont initialement moins chargées. Ces couverts dégradés sans sous-bois de l'amont sont à l'origine de bien des ravinements des versants droits et gauches de la partie moyen-aval du bassin.

Sur affleurements marneux, cette dégradation des sous-bois entraîne, dans les mêmes délais, un ravinement dès les sommets, ce qu'attestent les ravins et bad-lands découverts en rive droite, également sous forêt, en amont du bassin.

Ce qui précède met l'accent sur l'absolue nécessité de protéger les différentes strates des sous-bois des reliquats de forêts et des garrigues denses ainsi que les débris végétaux que ceux-ci génèrent et qui sont à l'origine des sols différenciés sous ces formations (humidité, acidité). Cette protection doit être orientée contre l'errance non contrôlée des troupeaux et contre d'excessifs prélèvements de bois de chauffe: il y va de la maintenance des terres cultivables sur les versants et de la durée de vie du barrage.

Dans le cadre d'une gestion intégrée du bassin versant, les mesures à préconiser vont dans le même sens que celles projetées par nos collègues agronomes dans leur souci de trouver de nouveaux itinéraires culturaux pour, entr'autres choses, améliorer les ressources alimentaires des ovins. Il va sans dire que cette recherche doit trouver sa voie plus dans l'amélioration de systèmes producteurs de fourrages que dans le défrichement de nouvelles terres tel que cela apparaît en lisière des zones forestées de la rive droite.

Dans une autre direction, il a été possible de constater la grande efficacité des banquettes de terre construites il y a quelques années et continuant à limiter d'un facteur 10 les risques de pertes en terre en années « normales ». Cette efficacité explique que certaines de ces banquettes soient actuellement presque comblées, il faut alors craindre, maintenant, les effets d'évènements pluviaux paroxysmaux.

Concernant les cultures elles-mêmes, on retrouve là encore des choses évidentes comme :

- une très sensible augmentation de l'effet protecteur des cultures les mieux venues tant en ce qui concerne un bon choix de la période des semis, qu'en raison de la qualité des soins ultérieurs apportés par le paysan, ou encore la chance d'avoir des terres relativement plus fertiles ou à meilleure économie de l'eau,

- en ce qui concerne les calendriers culturaux, il convient de répéter qu'il faut s'efforcer de faire coïncider les périodes de fortes précipitations avec les meilleures conditions de résistance et d'infiltrabilité des sols. C'est alors que, sur sols profonds, il faut distinguer deux situations :

- . situation favorable des sols argilo-limoneux profonds labourés précocement, à grosses mottes, sur bancs marneux dominants ; ces sols sont probablement les moins vulnérables tant par leurs régénérations structurales naturelles (fragmentation des mottes par alternances d'humectation et de dessiccation) que pour ce qui est de la meilleure résistance de leurs structures,

- . situation critique des sols limono-sableux différenciés sur bancs calcaires dominants qui se « glacent » rapidement en surface par effondrement rapide des structures et apparition de pellicules de battance, ce caractère, ajouté à celui d'une structuration profonde médiocre, les imperméabilise rapidement après labour, ceci étant accéléré par tous travaux de pulvérisation.

Dans le cadre d'une protection intégrée du bassin versant il ne fait aucun doute qu'une gestion mieux intégrée des assolements et des pacages sur les versants les plus vulnérables devrait viser à une meilleure alternance topographique entre les « bandes productrices d'érosion » et les « bandes d'arrêt de cette érosion ». De même, il est irresponsable de ne pas inciter à faire traiter rapidement les premières rigoles dès leur apparition sur des affleurements marneux cultivés alors qu'existent à quelques centaines de mètres en amont, des bancs calcaires pouvant faire office de carrières pour tous enrochements protecteurs possibles.

Il ne fait pas de doute que le bassin de Zanfour est, heureusement, encore à un stade où il peut recevoir utilement les mesures techniques ou scientifiques pour conserver en l'état son potentiel agricole actuel et aider les paysans à le gérer au plus près pour une production optimale. Ces concepts visent, au court terme, des profits permis par des améliorations de récoltes et d'élevage, ceci est susceptible d'intéresser le paysan pour l'inciter à participer aux mesures visant, cette fois au long terme: la conservation des ressources en terre sur les versants et celle des ressources en eau sur le barrage.

BIBLIOGRAPHIE

CES, 1995

Guide de conservation des eaux et du Sol, projet PNUD/FAO, TUN/86/020. Ministère de l'Agriculture, Direction de la Conservation des Eaux et des Sols, 274 p., Tunis, 1995.

BORST H.L., WOODBURN R., 1940

Rain simulator studies of the effect of slope on erosion and runoff. U.S. Depart. of Agronomy.SCS-TP-36

COLLINET J. 1988

Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'ouest - évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse Doctorat Université Louis Pasteur, Strasbourg. 513p. 1988.

CPCS, 1967

Classification des sols, par commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Coord. J. Boulaine, 27 auteurs. Labos. de géologie-Pédologie de ENSA de Grignon. 87p.

CTFT, 1979

Conservation des sols au sud du Sahara. Collection techniques rurales en Afrique, 2ème édition, Ministère de la Coopération. 296 p., 1979.

DANGLER E.W., EL-SWAIFY S.A., AHUJA L. R., BARNETT A. P., 1976

Erodibility of selected Hawaii soils by rainfall simulation, Agricultural reasearch service, US department of agriculture, western region, 113 p. , 1976

F.A.O., 1968

Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World. World Soil Resources Report FAO n°33. 73p. 1968.

F. A O. - ISSS - ISRIC 1994

World Reference Base for Soil Resources. Edit. par O.C. Spaargaren. 38 auteurs. 161. 1994

F.A.O., 1993

Guide pratique d'aménagement des bassins versants - Etude et planification, par T.C. Sheng, Prof. Dep. of Earth Reources, Colorado State University. Cahier FAO "Conservation" 13/6. 185p. 1993

F.A.O., 1994

Guide pratique d'aménagement des bassins versants - Conception et construction des routes dans les bassins versants sensibles. Coordon. J.P. Lanly Directeur de la Division des ressources forestières, Département des Forêts, Université de Washington. Cahier FAO "Conservation" 13/5. 205p. 1994

HEUSCH B., 1970

L'Erosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. Rapport 1970 de la station de recherches forestières de Rabat, T. 12, 176 p., 1970.

HUDSON N.W., 1973

Soil Conservation. B.T. Bastsford Limited, London, 320p.

LEPRUN J.C., 1983

Relatorio de Fim de convenio de manajo et conservacao do solo no nordeste Brasileiro. SUDENE, ORSTOM, Recife, 290 p.

MASSON J.M., 1971

L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse USTL, 213p + annexes, 1971.

NASRI S., 1990

Contribution à l'étude de la Dynamique érosive dans le bassin versant de l'oued Ettiour. Mem. de fin d'études du cycle de spécialisation. INAT de Tunis, 90p. 1990

ONIBON H., 1997

Erosion et transport solide. Rapport d'avancement de Mémoire de DEA, ENIT, IRD, Tunis, 1997

REKIK M., CHEKALI S., 2001

Projet de recherche développement sur l'agriculture pluviale autour de la retenue collinaire de Zanfour, E.S.A.K., C.R.D.A. du Kef, 47 p., 2001

ROOSE E., 1977

Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales, Travaux et documents n°78, ORSTOM Paris, 1977.

SEDES, (sans date)

Estimation des coûts de production et des revenus en Tunisie du nord. République tunisienne, S.E.P.F.

SOIL TAXONOMY , 1975

A basic system of Soil Classification for making and interpreting Soil Surveys. par Soil Survey Staff. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook n° 436. 754p. 1975.

WISCHMEIER W. H. , SMITH D. D., UHLAND R.E., 1958

Evaluation of factors in the soil loss equation. Agronomy Engineering, 39, 8, pp.458-462

WISCHMEIER W. H., 1959

A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., V. 23, p. 246-249

WISCHMEIER W. H., 1960

Cropping management factor evaluation for an universal soil loss equation. Soil Science Society of America Proceedings; 23, pp. 246-249.

WISCHMEIER W. H. and SMITH D. D., 1960

A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning, 7 th. Cong. Of Intern. Soil Sci. Soc., V.,I, p. 418-425.

WISCHMEIER W. H. and SMITH D. D., 1965

Predicting rainfall erosion losses from cropland. U.S.D.A. Agr. Handbook n° 282, 47p., U.S. Gov. Printing Office, Wash. D.C.

WISCHMEIER W. H., 1966

Relation of Field-Plot Runoff to Management and Physical Factors. Soil Science Society of America Proc., V. 30, p. 272-277.

WISCHMEIER W. H., JOHNSON C.B., CROSS B.V. , 1971

A soil erodibility nomograph for farmlands and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation - Soil Science Society of America 26, 5, pp. 189-192.

WISCHMEIER W. H., 1972

Upslope erosion analysis, from Environmental Impact on Rivers, chapt. 15, pp. 15-1 à 15-26, H. W. SHEN Publisher

WISCHMEIER W. H., 1974

New developments in estimating water erosion. Reprint. of the 29th. Annual meeting of the SSS of America, august 1974, Syracuse, New York. pp.179-195

ZING A.W., 1940

Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. Agr. Eng. 21, pp.56-64

---0---

ANNEXES

ANNEXE 1 : Calcul des pentes par la méthode des cercles

Formule $100(n \times q) / (d \times e)$

Avec : n : nombre d'intervalles dans le cercle,
 q : équidistance des courbes en m
 d : diamètre du cercle en m
 e : échelle (ex : 10 000 pour une échelle au 1/10 000)

Nombre d'intervalles	Echelle: 1/10 000 (Eq:10)				Echelle: 1/12 500 (Eq:10)				Echelle: 1/20 000 (Eq:10)			
	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015
1	20,0	13,3	10,0	6,7	16,0	10,7	8,0	5,3	10,0	6,7	5,0	3,3
2	40,0	26,7	20,0	13,3	32,0	21,3	16,0	10,7	20,0	13,3	10,0	6,7
3	60,0	40,0	30,0	20,0	48,0	32,0	24,0	16,0	30,0	20,0	15,0	10,0
4	80,0	53,3	40,0	26,7	64,0	42,7	32,0	21,3	40,0	26,7	20,0	13,3
5	100,0	66,7	50,0	33,3	80,0	53,3	40,0	26,7	50,0	33,3	25,0	16,7
6	120,0	80,0	60,0	40,0	96,0	64,0	48,0	32,0	60,0	40,0	30,0	20,0
7	140,0	93,3	70,0	46,7	112,0	74,7	56,0	37,3	70,0	46,7	35,0	23,3
8	160,0	106,7	80,0	53,3	128,0	85,3	64,0	42,7	80,0	53,3	40,0	26,7
9	180,0	120,0	90,0	60,0	144,0	96,0	72,0	48,0	90,0	60,0	45,0	30,0
10	200,0	133,3	100,0	66,7	160,0	106,7	80,0	53,3	100,0	66,7	50,0	33,3

Nombre d'intervalles	Echelle: 1/30 000 (Eq:10)				Echelle: 1/50 000 (Eq:10)				Echelle: 1/100 000 (Eq:10)			
	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015
1	6,7	4,4	3,3	2,2	4,0	2,7	2,0	1,3	2,0	1,3	1,0	0,7
2	13,3	8,9	6,7	4,4	8,0	5,3	4,0	2,7	4,0	2,7	2,0	1,3
3	20,0	13,3	10,0	6,7	12,0	8,0	6,0	4,0	6,0	4,0	3,0	2,0
4	26,7	17,8	13,3	8,9	16,0	10,7	8,0	5,3	8,0	5,3	4,0	2,7
5	33,3	22,2	16,7	11,1	20,0	13,3	10,0	6,7	10,0	6,7	5,0	3,3
6	40,0	26,7	20,0	13,3	24,0	16,0	12,0	8,0	12,0	8,0	6,0	4,0
7	46,7	31,1	23,3	15,6	28,0	18,7	14,0	9,3	14,0	9,3	7,0	4,7
8	53,3	35,6	26,7	17,8	32,0	21,3	16,0	10,7	16,0	10,7	8,0	5,3
9	60,0	40,0	30,0	20,0	36,0	24,0	18,0	12,0	18,0	12,0	9,0	6,0
10	66,7	44,4	33,3	22,2	40,0	26,7	20,0	13,3	20,0	13,3	10,0	6,7

Nombre d'intervalles	Echelle: 1/50 000 (Eq:25)				Echelle: 1/100 000 (Eq:25)				Echelle: 1/200 000 (Eq:25)			
	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,005	0,0075	0,01	0,015
1	10,0	6,7	5,0	3,3	5,0	3,3	2,5	1,7	2,5	1,7	1,3	0,8
2	20,0	13,3	10,0	6,7	10,0	6,7	5,0	3,3	5,0	3,3	2,5	1,7
3	30,0	20,0	15,0	10,0	15,0	10,0	7,5	5,0	7,5	5,0	3,8	2,5
4	40,0	26,7	20,0	13,3	20,0	13,3	10,0	6,7	10,0	6,7	5,0	3,3
5	50,0	33,3	25,0	16,7	25,0	16,7	12,5	8,3	12,5	8,3	6,3	4,2
6	60,0	40,0	30,0	20,0	30,0	20,0	15,0	10,0	15,0	10,0	7,5	5,0
7	70,0	46,7	35,0	23,3	35,0	23,3	17,5	11,7	17,5	11,7	8,8	5,8
8	80,0	53,3	40,0	26,7	40,0	26,7	20,0	13,3	20,0	13,3	10,0	6,7
9	90,0	60,0	45,0	30,0	45,0	30,0	22,5	15,0	22,5	15,0	11,3	7,5
10	100,0	66,7	50,0	33,3	50,0	33,3	25,0	16,7	25,0	16,7	12,5	8,3

ANNEXE 2 : Bassin versant oued zanfour, calcul des pentes

N° obs.	Long. cm	dénivelée m	long.Hz m	pente %	classe pente
1	0,5	20	150	13,333	10<15
2	0,45	20	135	14,815	10<15
3	1	20	300	6,667	5<10
4	3,55	40	1065	3,756	0<5
5	1,15	20	345	5,797	5<10
6	1,2	20	360	5,556	5<10
7	0,95	30	285	10,526	10<15
8	1,15	30	345	8,696	5<10
9	0,45	30	135	22,222	20<30
10	0,95	30	285	10,526	10<15
11	1,05	30	315	9,524	5<10
12	1,6	40	480	8,333	5<10
13	1,1	50	330	15,152	15<20
14	0,6	30	180	16,667	15<20
15	1,8	50	540	9,259	5<10
16	1,75	50	525	9,524	5<10
17	1,25	50	375	13,333	10<15
18	0,65	30	195	15,385	15<20
19	1,2	70	360	19,444	15<20
20	1,75	40	525	7,619	5<10
21	0,9	30	270	11,111	10<15
22	1,2	40	360	11,111	10<15
23	0,85	50	255	19,608	15<20
24	0,25	30	75	40,000	>=40
25	1,2	50	360	13,889	10<15
26	1,2	30	360	8,333	5<10
27	1,3	30	390	7,692	5<10
28	1,65	40	495	8,081	5<10
29	1,55	90	465	19,355	15<20
30	1,3	40	390	10,256	10<15
31	0,85	40	255	15,686	15<20
32	0,9	80	270	29,630	20<30
33	1,2	60	360	16,667	15<20
34	1,5	40	450	8,889	5<10
35	0,9	60	270	22,222	20<30
36	2	70	600	11,667	10<15
37	1,5	30	450	6,667	5<10
38	0,7	60	210	28,571	20<30
39	1	70	300	23,333	20<30
40	1,65	60	495	12,121	10<15
41	2	30	600	5,000	5<10
42	1,2	50	360	13,889	10<15
43	1,25	20	375	5,333	5<10
44	1,15	90	345	26,087	20<30
45	1,6	40	480	8,333	5<10
46	1,45	40	435	9,195	5<10
47	1,25	60	375	16,000	15<20
48	0,75	50	225	22,222	20<30
49	0,6	100	180	55,556	>=40
50	1,6	50	480	10,417	10<15
51	0,6	40	180	22,222	20<30
52	1,1	40	330	12,121	10<15

Bassin versant oued zanfour, calcul des pentes (suite)

N°	long. cm	dénivelée m	long.Hz m	pente %	classe pente
53	0,4	40	120	33,333	30<40
54	1,3	40	390	10,256	10<15
55	0,8	80	240	33,333	30<40
56	1,3	70	390	17,949	15<20
57	1,4	40	420	9,524	5<10
58	1,6	50	480	10,417	10<15
59	1	50	300	16,667	15<20
60	1,1	30	330	9,091	5<10
61	1,45	50	435	11,494	10<15
62	1	30	300	10,000	10<15
63	1,6	30	480	6,250	5<10
64	1,45	40	435	9,195	5<10
65	1,8	30	540	5,556	5<10
66	3,6	60	1080	5,556	5<10
67	0,6	20	180	11,111	10<15
68	2	40	600	6,667	5<10
69	1,75	30	525	5,714	5<10
70	1	30	300	10,000	10<15
71	0,85	20	255	7,843	5<10
72	1,4	30	420	7,143	5<10
73	1,65	30	495	6,061	5<10
74	2	40	600	6,667	5<10
75	2,6	20	780	2,564	0<5

ANNEXE 3 : Bassin versant oued Zanfour, calcul des indices SL

N° mesure	classe pente	SL retenu			classe SL
		érosion en rigole/érosion en nappe			
		faible	moyen	fort	
1	10<15	3,60			2<4
2	10<15	3,96			2<4
3	5<10	2,19			2<4
4	0<5	2,10			2<4
5	5<10	2,03			0<2
6	5<10	1,99			0<2
7	10<15	3,47			2<4
8	5<10	3,00			4<6
9	20<30	6,96			6<8
10	10<15	3,47			2<4
11	5<10		4,79		4<6
12	5<10		4,84		4<6
13	15<20		8,62		8<10
14	15<20		7,67		6<8
15	5<10			8,22	8<10
16	5<10		5,81		6<8
17	10<15			10,86	10<15
18	15<20			10,13	10<15
19	15<20		12,57		10<15
20	5<10	3,05			2<4
21	10<15		5,38		4<6
22	10<15	4,06			4<6
23	15<20	7,57			8<10
24	>=40		19,03		15<20
25	10<15			11,24	10<15
26	5<10			6,46	6<8
27	5<10		4,14		4<6
28	5<10		4,74		4<6
29	15<20		13,85		10<15
30	10<15	3,80			4<6
31	15<20		8,13		8<10
32	20<30		20,18		20<25
33	15<20	6,94			6<8
34	5<10			7,40	6<8
35	20<30	9,28			8<10
36	10<15	5,31			4<6
37	5<10	2,52			2<4
38	20<30	12,06			10<15
39	20<30	10,39			10<15
40	10<15		7,59		6<8
41	5<10		3,27		4<6
42	10<15		7,96		6<8
43	5<10	1,95			0<2
44	20<30		18,60		15<20
45	5<10	3,25			2<4
46	5<10	3,49			2<4
47	15<20			13,64	15<20
48	20<30	8,61			8<10
49	>=40	24,19			20<25

Bassin versant oued zanfour, calcul des indices SL (suite)

N° mesure	classe pente	faible	moyen	fort	classe SL
50	10<15	4,21			4<6
51	20<30	7,85			6<8
52	10<15	4,37			4<6
53	30<40	12,10			10<15
54	10<15	3,80			4<6
55	30<40		22,61		20<25
56	15<20			16,09	15<20
57	5<10			7,75	8<10
58	10<15		6,23		6<8
59	15<20			13,19	10<15
60	5<10		4,63		4<6
61	10<15		6,75		6<8
62	10<15		4,96		4<6
63	5<10			5,52	6<8
64	5<10			7,57	6<8
65	5<10			5,23	4<6
66	5<10	2,92			2<4
67	10<15	3,10			2<4
68	5<10	2,80			2<4
69	5<10	2,31			2<4
70	10<15	3,33			2<4
71	5<10	2,42			2<4
72	5<10	2,63			2<4
73	5<10	2,38			2<4
74	5<10	2,80			2<4
75	0<5	1,52			0<2

ANNEXE 4 : Valeurs du coefficient C de l'équation de WISCHMEIER A = R (K LS C P) selon différents auteurs

- CTFT Conservation des sols au sud du Sahara (valeurs pour l'Afrique du Nord)

Type de culture	C
Jachère travaillée	1
Arboriculture fruitière	0.90
Blé	0.71
Assolement céréalière	0.40
Assolement avec fourrage	0.15 à 0.23
Prairie améliorée bien constituée	0.01

- THESE de J.M. MASSON, 1971.

<u>Végétation pérenne</u>	
type	C
vigne, vergers au sol travaillé continuellement	0,9
Parcours ordinaires	0,15
reboisement	0,15
Forêt claire	0,05
Forêt dense ou pâturage dense	0,01

variations de l'indice C selon les assolements
(Dorsale à Sidi Boubakar, soustraire 0.05 pour Tunis, 0.1 pour Le Kef)

<u>Assolements</u>	
Assolements biennaux	
	C
Céréales – Jachère	0,4
Céréales – vesce avoine / légumineuse d'hiver	0,55
Céréales – vesce avoine	0,5
Assolements triennaux	
Céréales - céréales - légumineuses d'hiver	0,6
Céréales - céréales - fourrage, Céréales - céréales - engrais vert pâturé.	0,55
céréales - céréales - jachère	0,5
Assolements quadriennaux	
Céréales – vesce avoine - céréales - légumineuses d'hiver Céréales - fourrage - céréales - légumineuses d'hier	0,55
Assolements spéciaux	
Céréales - céréales – fourrage – fourrage	0,4
Céréales - fourrage – fourrage	0,35
Céréales - céréales - prairie 6 ans	0,2

Culture d'une céréale: valeur de C selon le cycle cultural		
	période	C
labour, jachère travaillée	1/9 - 1/11	0,65
semis	1/11 - 1/12	0,7
établissement	1/12 - 1/3	0,45
végétation	1/3 - 15/6	0,15
chaumes, jachère pâturée	15/6 - 1/9	0,2
chaumes sans pailles		0,2
chaumes avec pailles		0,12

Variations de C selon le cycle cultural pour diverses cultures					
	période				
1: labour, jachère travaillée	1/9 - 1/11				
2: semis	1/11 - 1/12				
3: établissement	1/12 - 1/3				
4: végétation	1/3 - 15/6				
5: chaumes et jachère pâturée	15/6 - 1/9				
culture	Période culturale				
	1	2	3	4	5
Céréale avec retournement, pas de pâturage de plus de 2 ans consécutifs, paille ramassée	0,65	0,7	0,45	0,15	0,2
Fourrage Vesce/Avoine dans un assolement céréalière avec retournement, sans pâturage de plus de 2 ans consécutifs	0,65	0,7	0,4	0,07	0,2
Plante sarclée type fèves, dans un assolement céréalière avec retournement, sans pâturage de plus de 2 ans consécutifs	0,65	0,7	0,6	0,32	0,8
Pâturage	0,01 à 0,03				
1 ère année de céréales après 3 ans de pâturage	0,23	0,4	0,4	0,1	0,15
2ème année de céréale après 3 ans de pâturage et 1 céré	0,6	0,65	0,45	0,15	0,2

- **L'EROSION DU PRE-RIF (HEUSCH, 1970)**

Occupation du sol	Coefficient C
Culture mécanisée	0.25
Culture attelée (céréales)	0.12
Matorral cultivé (céréales)	0.10
Vergers (oliviers)	0.08 (NB : probablement pas sarclés)
Ermes (parcours)	0.06
Zones de DRS (banquettes mises en défens et plantées)	0.04 ?
Matorral	0.02
Forêts dégradées	0.01

Assolement	Coefficient C
Blé dur – bersim/sorgho	0.37
Blé dur – chou/pois chiche – sulla	0.36
Blé dur – sorgho	0.37
Blé dur – mélilot	0.26
Blé dur – vesce avoine - sorgho	0.29
Blé dur - bersim	0.25
Blé dur – vesce avoine	0.24
Blé dur - fève	0.44
Blé dur – vesce avoine - fève	0.34
Blé dur - jachère	0.24

- **MEMOIRE DE SPECIALISATION INAT de S. NASRI, 1990**

Zone forestière

Vigueur du boisement	Couvert arboré (%)	Litière forestière (%)	Type de sous bois	Indice C
Bon peuplement	75 - 100	90 - 100	- Pâturage contrôlé	0.001
			- Paturage non contrôlé	0.003 – 0.011
Peuplement moyen	40 - 70	75 - 85	- Pâturage contrôlé	0.002 – 0.004
			- Paturage non contrôlé	0.01 – 0.04
Peuplement pauvre	20 - 35		- Pâturage contrôlé	0.003 – 0.009
			- Paturage non contrôlé	0.02 – 0.09

(d'après FAO, 1977)

zone de culture, calcul pour la région de Haffouz

Type d'assolement	Indice C
Triennal :	
Blé – orge – jachère	0.63
Blé ou orge - jachère - jachère	0.81
Biennal :	
Blé ou orge – Jachère	0.72
Blé ou Orge – Blé ou Orge	0.44
Oliviers avec en culture intercalaire :	
Blé ou Orge – Jachère	0.65
Blé ou Orge – Blé ou Orge – Jachère	0.57

ANNEXE 5: Fiche de description des sites (milieux, sols, occupations)

BASSIN VERSANT :	DATE :
Observation N° :	NOM :

GEOLOGIE GEOMORPHOLOGIE

Paysage	Forme	Roche	Pente et longueur	couverture pédo épaisseur	Dynamique actuelle

OCCUPATION ET AMENAGEMENT

FORET - GARRIGUE - MAQUIS					
Ligneux hauts		Ligneux bas		Strate au sol	
2 m	4 m	0.5 m		PARCOURS	JACHERE
Nom	Nom	Nom	Nom	Nom	Nom
%	%	%	%	%	%

ARBO FRUITIER	OLIVIERS	CULTURE	ASSOLEMENT	IRRIGATION	Travaux CES
% arbre	% arbre				
% herbes	% herbes				

ETAT DE SURFACE

OPS	EG	Fentes	Microrelief	
PB %	%	Larg.		
PS %		Pfd.		
Mottes % cm	Graviers Cailloux Blocs	diam		

SOL

HUMIDITE	COULEUR	TEXTURE	STRUCTURE	MO	CONSISTANCE
		A %	F M G Massive		
		LSTF %	Nom :		
		SG %			

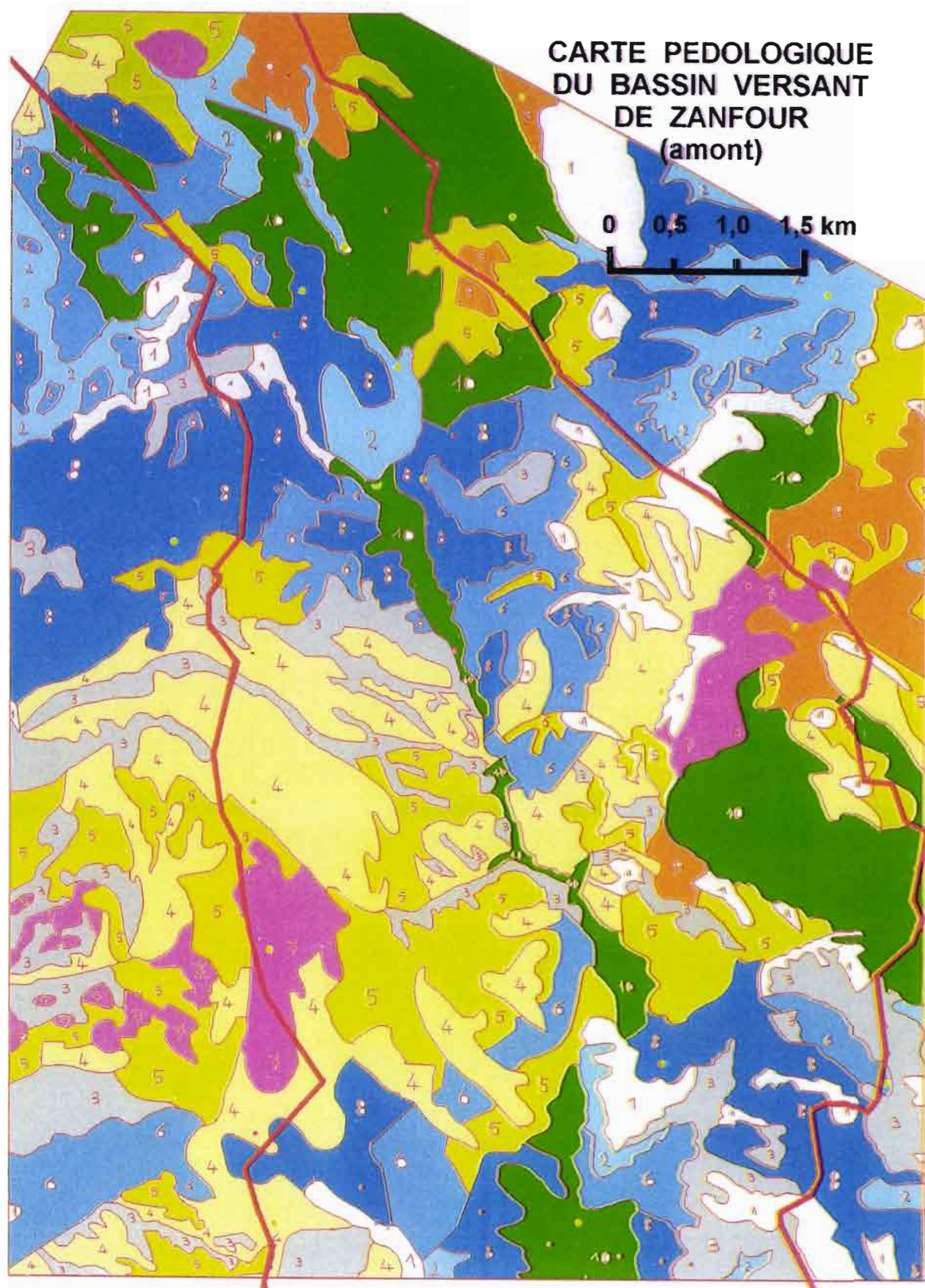
CLASSES DE PERMEABILITE (mm/h) CLASSES DE Da GRAVITE BIOLOGIQUE DE L'EROSION

200	100	50	1.00	1.25	1.40	1.60	1 ABC	2 (A)BC	3 BC	4 C ou R
R	R à M	M	M à L	L	TL					

ANNEXE 6 : Calcul de K par RUSLE Maroc pour tous les sites

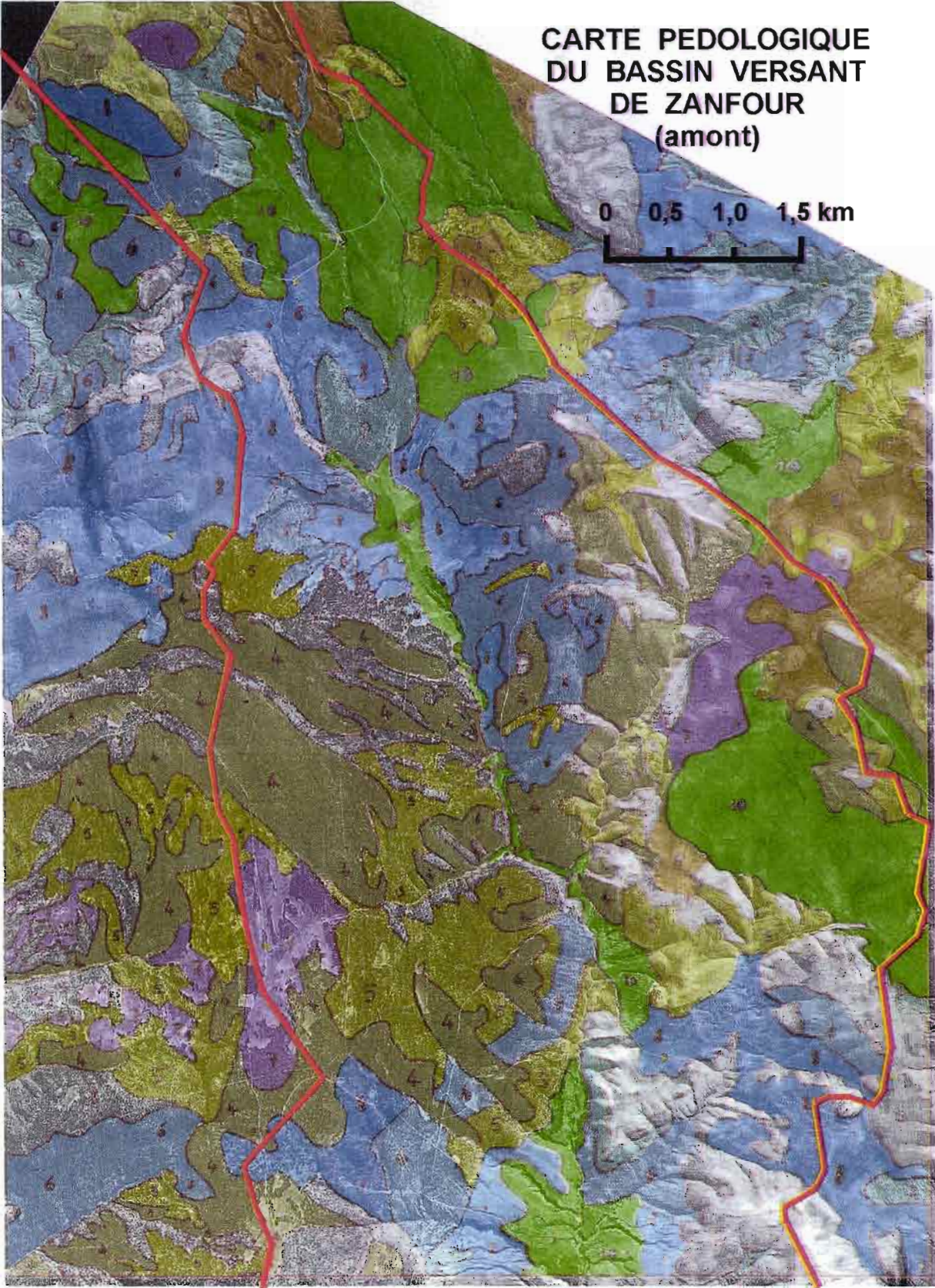
sites	unité	% lim + stf	% arg.	% M.O.	code struct	code perm.	% EG surface	% > 75mm	% pondér. TF	K si	K us
1	inconnu	?									
2	10	40	35	0,7	2	4	30	0	69	0,028	0,212
3	9	40	30	1,5	2	4	0	0	95	0,021	0,159
4	colluvion	10									
5	5	50	25	1	2	1	80	0	12	0,016	0,121
6	croûte	1									
7	9	30	40	0,7	2	4	30	0	57	0,026	0,197
8	5	35	40	1,8	2	2	90	0	6	0,027	0,205
9	9	40	25	0,7	2	1	40	0	46	0,033	0,250
10	8	20	55	1,2	3	4	0	0	95	0,015	0,114
11	8	25	45	1	2	1	5	0	91	0,005	0,038
12	7	40	25	4	3	1	10	0	84	0,018	0,136
13	7	30	60	2	2	4	5	0	91	0,017	0,129
14	8	30	50	1,5	3	2	20	0	69	0,016	0,121
15	4	33	33	1,5	2	3	25	0	63	0,022	0,167
16	5	60	30	1,5	2	2	100	0	0	0,036	0,273
17	8	40	50	1,5	2	2	2	0	95	0,014	0,106
18	10	50	45	1,7	2	2	2	0	95	0,025	0,189
19	10	45	40	1	3	5	25	0	63	0,039	0,295
20	8	40	50	0,5	3	5	2	0	95	0,029	0,220
21	calc+marn	1									
22	5	70	25	2	3	5	60	0	27	0,061	0,462
23	9	40	35	2,5	2	1	5	0	91	0,014	0,106
24	10	35	50	1,7	3	1	10	0	95	0,012	0,091
25	8	30	50	1,7	2	2	5	0	95	0,004	0,030
26	8	30	60	1,7	2	3	5	0	95	0,003	0,023
27	6	50	30	0,7	3	4	10	0	84	0,042	0,318
28	7	35	40	2	2	2	20	0	69	0,017	0,129
29	5										
30	6	75	15	0,5	3	4	20	0	69	0,074	0,561
31	10	40	40	0,7	3	4	40	0	46	0,036	0,273
32	10	30	50	2	3	4	40	0	46	0,026	0,197
33	9	30	45	1,5	3	3	50	0	36	0,028	0,212
34	9	35	30	1,5	2	5	30	0	57	0,031	0,235
35	9	30	45	1,5	2	3	50	0	36	0,023	0,174

ANNEXE 7 : Carte pédologique



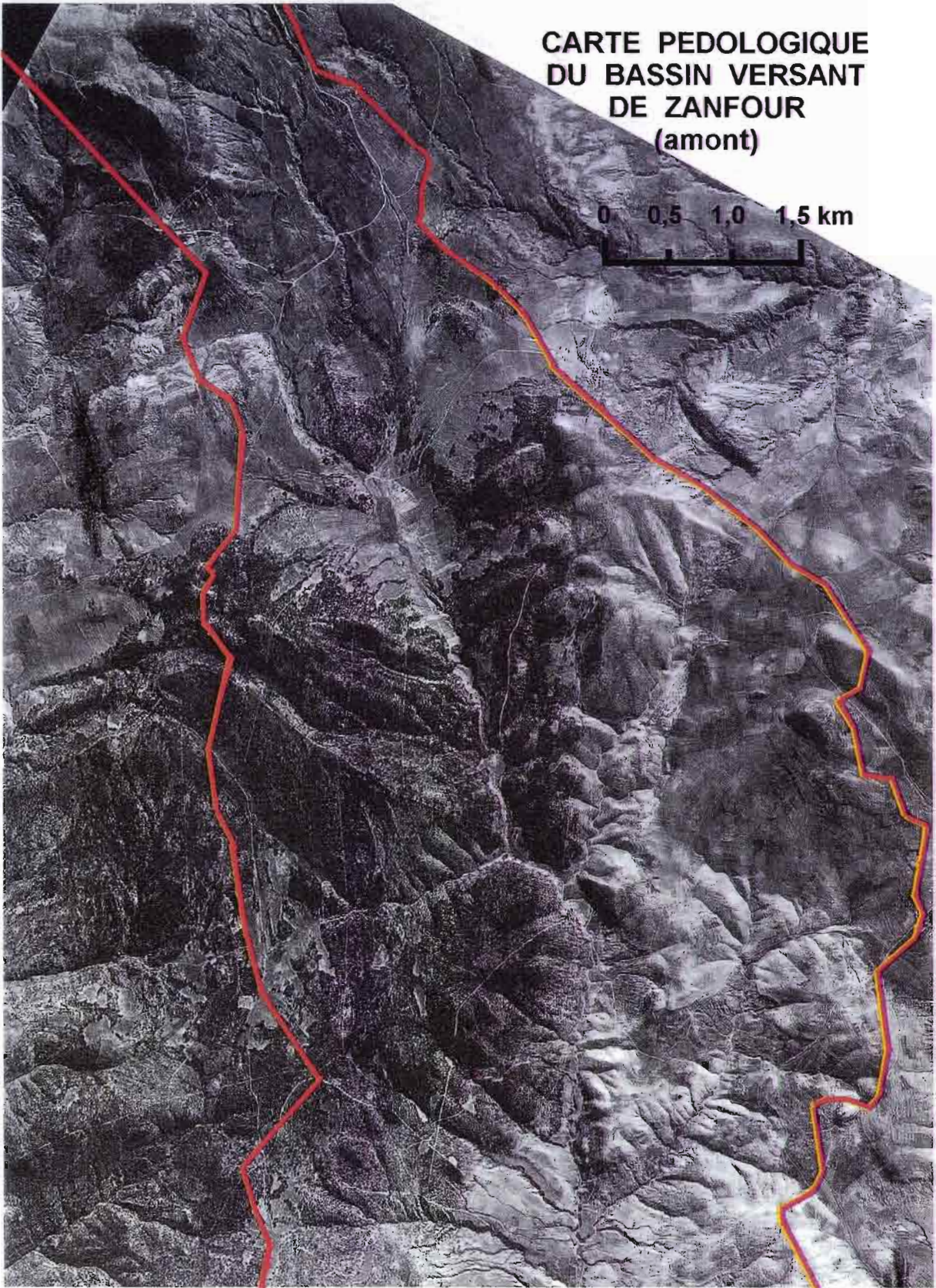
**CARTE PEDOLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT
DE ZANFOUR
(amont)**

0 0,5 1,0 1,5 km

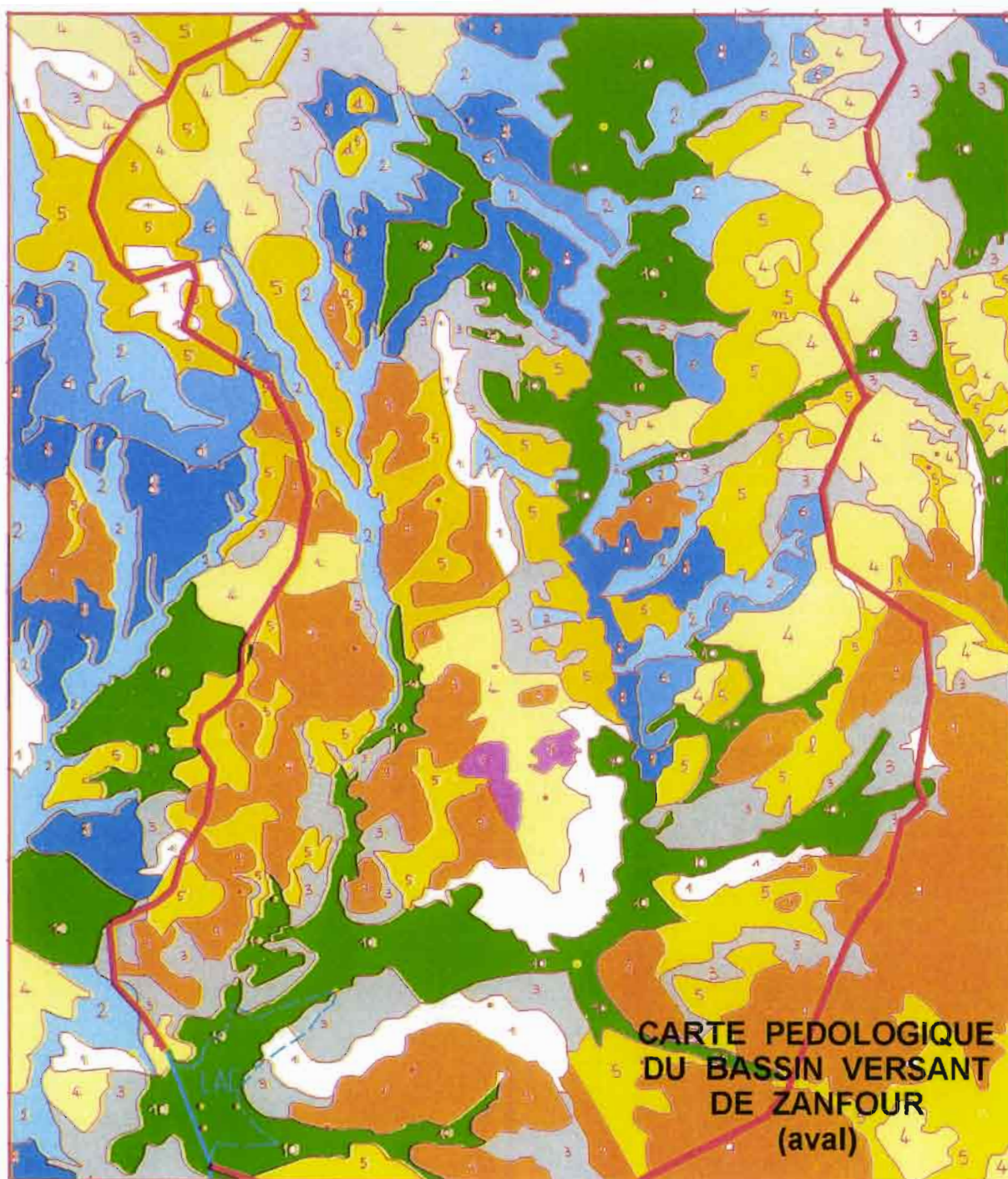


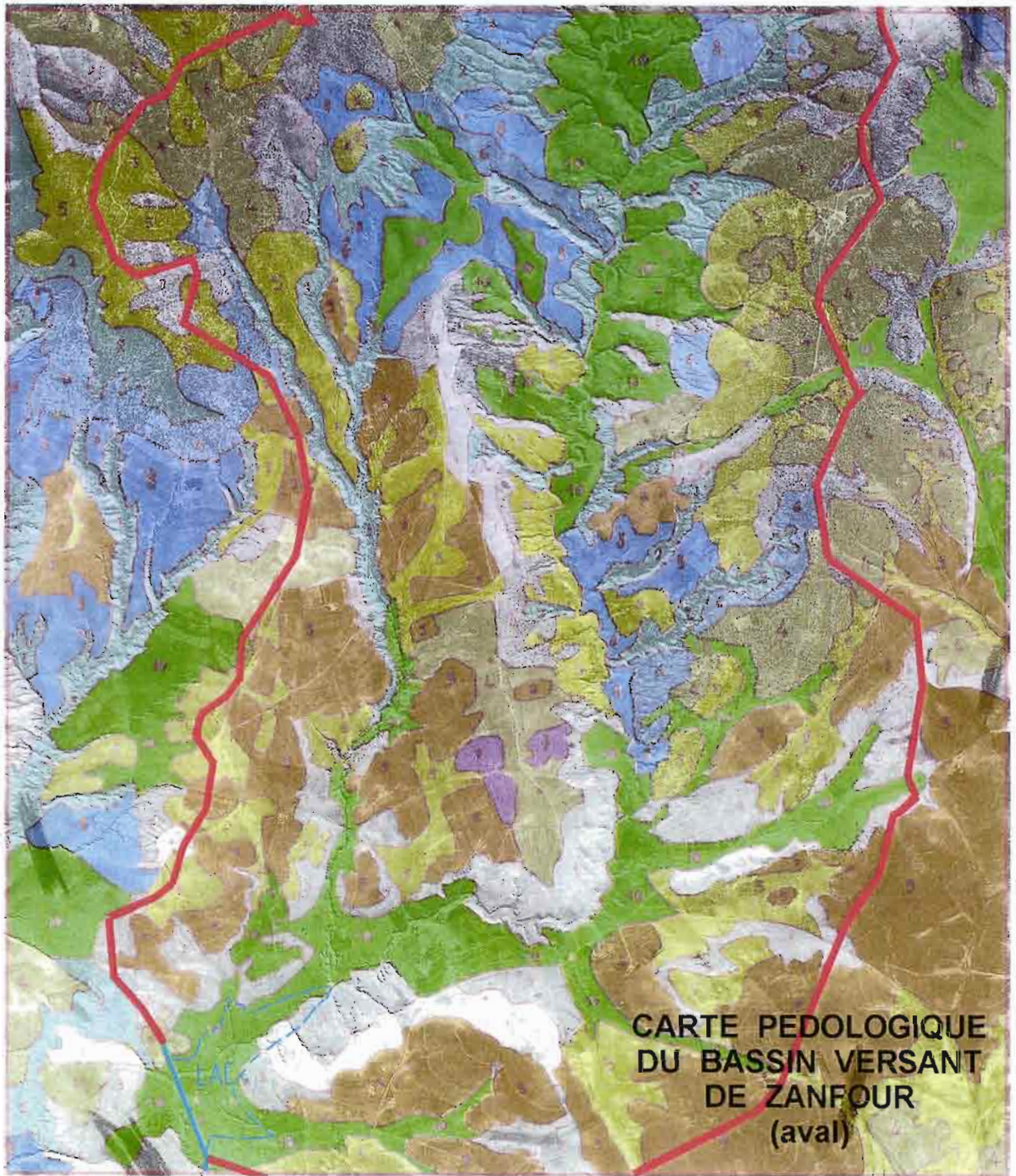
**CARTE PEDOLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT
DE ZANFOUR
(amont)**

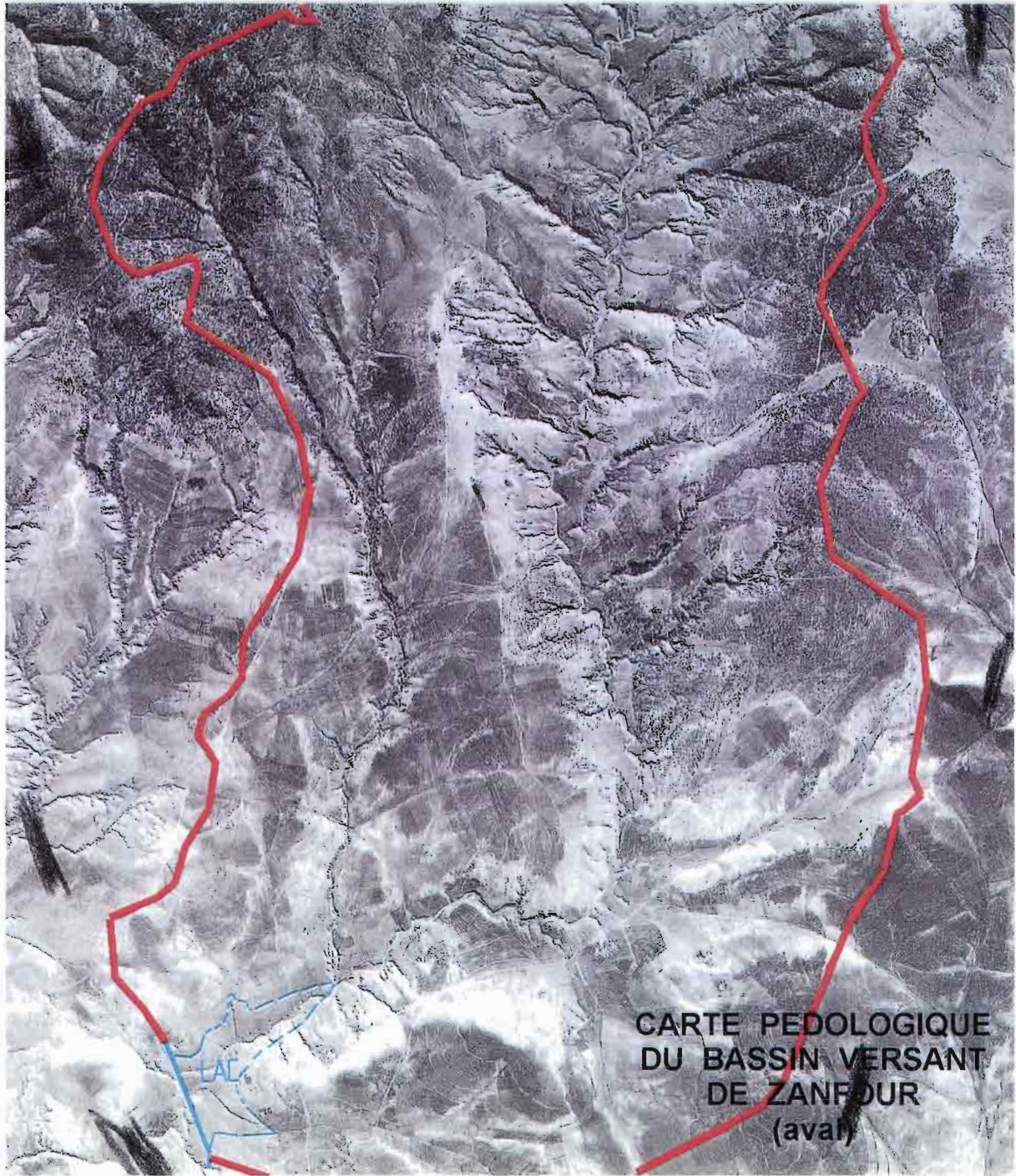
0 0,5 1,0 1,5 km



ANNEXE 7 (suite)







ANNEXE 8 : Légende de la carte pédologique

LEGENDE DE LA CARTE PEDOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE ZANFOUR

**Jean COLLINET, Patrick ZANTE
mission I R D, Tunis, avril 2001**

Avertissements

1) La carte pédologique du bassin versant de Zanfour doit permettre une caractérisation de l'érodibilité des sols . Si l'établissement des limites des unités cartographiques répond aux critères classiques de la science du sol, la définition des contenus est plus orientée vers l'objectif mentionné précédemment.

On s'est cependant attaché à donner à chaque unité une référence aux taxonomies les plus couramment utilisées actuellement.

2) Cette carte est divisée en une partie amont et une partie aval pour en faciliter la lecture sur un format 21 x 29,7mm. Chaque partie comprend trois documents: la carte pédologique proprement dite, la même carte incrustée sur le fond photographique, la photographie aérienne du bassin. Il est ainsi possible de localiser très exactement chaque unité et de visualiser ses relations avec le modelé.

3) Les numéros inscrits dans chaque unité de sol correspondent aux numéros de la légende développée ci-dessous.

A - Profondeur du matériau pédoplasmé < 40cm

1 - Sols minéraux bruts, non climatiques, d'érosion, lithosoliques sur bancs calcaires et croûtes calcaires dures (CPCS 1967), Orthents (Soil Taxonomy 1973), Regosols (FAO 1994)

Profil R. Affleurements de roches dures, sur croûte calcaire indurée continue. On peut admettre < 5% d'horizon (A) dans des fissures où s'installe une strate herbacée et arbustive peu dense du type Garrigue

Profondeur: sol squelettique , <10cm

Economie de l'eau très mauvaise sauf sur roches fissurées (calcaires à débits cubiques ou en plaquettes).

2 - Sols minéraux bruts, non climatiques, d'érosion, régosoliques sur bancs marneux (CPCS 1967), Orthents (Soil Taxonomy 1973), Regosols (FAO 1994)

Profil R, voire C. Rarement d'horizon (A) car les pentes sont trop fortes donc les flux trop intenses pour permettre une accumulation de matière organique. Il s'agit des flancs de ravines vives sur marnes et argilites beiges et grises. Profils en V, ce, contrairement aux parois taillées dans les colluvions qui sont en U, verticales et donc peu cartographiables. Nombreuses ramifications pouvant conduire à la formation de petites zones de bad-lands.

Profondeur: sol squelettique , <10cm

Economie de l'eau mauvaise, l'eau transite sans s'infiltrer sauf dans certaines griffes sur les berges des ravines

Problème: la totalité de ces sols est actuellement profondément ravinée

3 - Sols minéraux bruts, non climatiques, d'apport colluvial, avec épandages de fragments de calcaires ou de croûtes calcaires, sur bancs rocheux (CPCS 1967), Fluvents et Orthents (Soil Taxonomy 1973), Fluvisols et Regosols (FAO 1994)

Profil R. On peut admettre < 5% d' horizon (A) dans ces épandages où s'installent des strates herbacées et arbustives du style Garrigues denses (Gd). En contrebas de l'unité cartographique 1 (UC1) sur des pentes plus faibles.

Profondeur: sol squelettique , <10cm

Economie de l'eau moins mauvaise si les épandages sont graveleux.

Occupation : sols nus, ou Forêt claire.

4 - Juxtaposition de Sols peu évolués non climatiques, d'érosion, lithiques, sur bancs calcaires et croûtes calcaires dures, et de Rendzines (CPCS 1967), Orthents, Lithic rendolls, Eutrochreps (Soil Taxonomy 1973), Regosols , Calcic cambisols (FAO 1994)

Profil AC. Par évolution de l'UC1 ou dégradation de l'UC9 (suivantes). Quelques décimètres de terre meuble noire contenant une charge variable en fragments calcaires. L'horizon A est très sombre, bonne structure fragmentaire fine, texture argilo-limono-sableuse à sablo-limoneuse, il peut y avoir des amas sableux fins blanchis sous forêt dense en altitude. Moins de 10% d'épandages superficiels.

Profondeur: sol superficiel (<20cm) à Peu profond 1 (de 20 à 30cm sur RM impénétrable)

Occupation : Forêt dense, Garrigue dense à romarin et, récemment, Cultures progressant en lisières.

Economie de l'eau intéressante pour des forêts et plantations forestières: il y aura assez d'eau pour les jeunes plants, les forêts âgées (Forêt dense) sont de belle venue mais hétérogènes (vieux arbres rabougris), tout dépend de l'exploration racinaire profonde permise par la fissuration des calcaires.

Problème: sur les pentes > 10%, ces sols, encore riches en matière organique, sont actuellement défrichés ; ils ne résisteront que quelques décades sous cultures et que quelques années sous élevage ovin sauf s'il y a une gestion en parc donc une amélioration des pâturages ; toute pente >10% est à proscrire.

5 - Sols peu évolués non climatiques, d'érosion ou d'apport colluvial, avec épandages de fragments de calcaires ou de croûtes calcaires, sur matériau meuble puis roche calcaire ou croûte calcaire. (CPCS 1967), Fluvents et Orthents (Soil Taxonomy 1973), Fluvisols et Regosols (FAO 1994)

Profil A_u, / C I ou R I. Epandage d' éléments grossiers (EG) au dessus de l'UC4. Ces éléments grossiers (généralement 50% graviers, 50% cailloux calcaires, peu de blocs) proviennent soit d'un épandage gravitaire aidé par le ruissellement si la pente le permet (allochtonie), soit d'un enrichissement relatif en EG provenant du profil sous-jacent par érosion entraînant préférentiellement les " fines" (autochtonie). Il y a souvent concomitance des deux processus.

Profondeur: sol squelettique (<10cm) à peu profond 1 (de 20 à 30cm sur RM imperméable)

Economie de l'eau : plus intéressante que précédemment car l'épandage joue le rôle de mulch (protection contre l'évaporation et contre l'érosion).

Occupation : couverts de Forêt dense et Garrigue,

Problème: trop de pierrosité pour Cultures.

6 - Sols peu évolués non climatiques, d'érosion, régosoliques sur bancs marneux dominants (CPCS 1967), Orthents, Eutrochreps (Soil Taxonomy 1973), Regosols , Calcic cambisols (FAO 1994)

Profil AC. Quelques décimètres de sol. Limite A et C difficile à déterminer car les altérites de marnes sont, elles-mêmes, souvent meubles. Sols très limoneux, beige clair, faible teneur en MO, malgré cela, la structure peut être fine à moyenne et bien développée en hiver. Ils donnent rapidement 100% de pellicule de battance après labour et leurs surfaces lissées présentent des rigoles. De tels sols résultent de la mise en affleurement de marnes par disparition d'une protection (banc calcaire, sol encroûté ..) . Ils évoluent très vite en bad-land.

Profondeur: sol superficiel (<20cm) à peu profond 2 (de 15 à 20cm sur RM meuble)
Economie de l'eau: moyenne (bonne capillarité) mais l'infiltrabilité est faible du fait de l'apparition des pellicules de battance.

Occupation : Cultures (céréales) ; comme il y a peu de pentes <10%, leur utilisation dans ce bassin versant devrait se limiter à une stricte mise en défens en laissant se développer des couverts herbacés ras et buissonnants bas, surtout pas d'arboriculture. Une surveillance CES orientée sur l'apparition des rigoles et ravineaux est primordiale. L'installation de banquettes y est problématique.

Problème: Sols très érodibles, érosion linéaire sur pentes >10%, qui , prise à temps, peut être stoppée, ce qui n'est pas malheureusement pas le cas actuellement.

B - Profondeur du matériau pédoplasé > 40cm

7 - Sols isohumiques, à pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses, marrons, ou bruns isohumiques, modaux ou encroûtés sur roches carbonatées (CPCS 1967), Haplustolls, Ustochreps (Soil Taxonomy 1973), Haplic castanozems, Calcic cambisols (FAO 1994)

Profil A (B) C voire A B C, profonds (>100cm), texture argilo-limoneuse à argilo-limono-sableuse, (mode = 35% - 40% - 25%), de structure fine bien à moyennement développée, de couleur brun foncé homogène sur au moins 50cm. Taux d'éléments grossiers variables, ils peuvent contenir des charges importantes en plaquettes calcaires lorsqu'ils occupent des ensellement de versant ; en position plane, cette charge provient uniquement des fragmentations rocheuses sous-jacentes.

Profondeurs : sol moyennement profond 1 (30 à 60 cm sur roche mère impénétrable) à profond (de type 1) c'est-à-dire >80cm sur roche mère impénétrable.

Economie de l'eau : assez bonne, ce , d'autant plus que l'ETP est plus faible qu'en plaine
Occupation : Forêt en cours de dégradation.

Ces sols sont la "curiosité" de ce bassin versant. Situés vers +950m, ils ont été sauvegardés en amont du BV sur ses limites sud-est là où la forêt est encore peu dégradée. Dans ce milieu on trouve souvent en juxtaposition:

(i) ce qui reste des sols rouges méditerranéens: altérites et croûtes ou argiles rouges dans les fissures des calcaires,

(ii) ces sols sombres, parfois assez profonds.

Actuellement un microclimat plus frais entretenu par l'altitude relative et une forêt de résineux à litière acidifiante permettrait la conservation de sols bruns isohumiques quelque peu azonaux, déphasés et des reliquats de sols rouges méditerranéens. Si ces deux sols peuvent actuellement voisiner en ces sites d'altitude, leurs altéropédogénèses ne furent certainement pas contemporaines.

8 - Juxtaposition de : (i) sols calcimagnésiques, carbonatés, bruns calcaires, modaux, (ii) bruns calcaires à encroûtements, (iii) de sols calcimagnésiques, saturés, bruns calciques, sur roches marneuses dominantes. (CPCS 1967), Eutrochrepts, Ustochreps (Soil Taxonomy 1973) Calcic cambisols (FAO 1994)

Profil A (B) C. Profonds, souvent > 100cm. Limite (B) et C difficile à déterminer car les altérites de marnes sont elles-mêmes meubles. Sols argileux à argilo-limoneux (mode 50% - 40% - 10%) , bruns foncés sur 15cm, 1,5% à 2,0% MO, structure fine grenue et grumeleuse bien développée en hiver, forte dynamique structurale (argiles gonflantes fréquentes) . Ils donnent plutôt des pellicules structurales après labour et restent donc assez perméables après l'effondrement des labours. De tels sols résultent d'une altéropédogénèse sur marnes dominantes mais "armées" par de minces bancs calcaires, le tout en topographie peu déclive (pentes de 5 à 10%). Dans ces conditions topographiques il sont peu érodibles , ils le deviennent par contre au delà de ces seuils.

Profondeur: sol profond (de type 2), c'est à-dire >60cm sur roche mère meuble.

Economie de l'eau : bonne pour les textures les moins fines , moyennes pour les plus argileuses car la gamme d'eau utilisable est déviée vers les fortes humidités. Infiltrabilité bonne. Peu érodibles tant que l'on pourra limiter les ruissellements ce qui est faisable avec un bon calage du calendrier cultural (labour précoce) plutôt qu'avec des banquettes.

Occupation : Culture (céréales)

Problème : cette UC8 a de très bonnes caractéristiques, elle ne doit pas être confondue avec les UC6 et surtout UC2 extrêmement vulnérables sans mesures de conservation

9 - Juxtaposition de (i) sols calcimagnésiques, carbonatés, bruns calcaires, modaux, (ii) bruns calcaires à encroûtements, sur roches calcaires ou encroûtements (CPCS 1967), Eutrochrepts, Ustochrepts (Soil Taxonomy 1973) Calcic cambisols (FAO 1994)

Profil A (B) C ou A B C. Moyennement profonds à profonds, 50cm plus fréquent que 100cm. Graveleux et caillouteux dans le profil avec accumulation, plus relative qu'absolue, en surface de quelque 30% d'EG. Sols argilo-limono-sableux, (mode = 30% - 35% - 35%). Forment surtout des pellicules de battance par effondrement assez rapide des mottes de labour. Bruns à bruns-jaunâtres sur 15cm. Teneur en matière organique très variable selon la conduite des cultures (0,7% à 2%). Structure fine grenue et grumeleuse bien développée en hiver sur 15cm, massive en dessous. De tels sols résultent d'une altéropédogénèse sur alternances calcaires et marnes mais avec des bancs calcaires plus fréquents, le tout en topographie peu déclinée (pentes de 5 à 7%). Même pour ces pentes faibles, ils s'érodent en nappe plus par l'abondance du ruissellement qui apparaît rapidement après la pluie que par la mobilisation des terres, ces eaux de ruissellement restent peu chargées. Ils sont actuellement « sauvés » par les banquettes abondamment installées sur l'aval du BV

Profondeur: sols de 50 à 100cm

Economie de l'eau : médiocre à cause d'une faible infiltrabilité et d'un volume de terre plus faible que les sols sur marnes du fait d'une plus forte charge en EG.

Occupation : Cultures (céréales, maraîchage, fruitiers si irrigation)

Problème: érodible en nappe mais conservation par banquette très efficace.

10 - Sols calcimagnésiques, carbonatés, bruns calcaires, modaux, (ii) bruns calcaires à encroûtements, sur colluvions de comblements de vallée et sur terrasses récentes ((CPCS 1967), Eutrochrepts, Ustochrepts plus rarement Fluvents (Soil Taxonomy 1973) Calcic cambisols plus rarement Fluvisols (FAO 1994) -

Profil A (B) C ou A B C. Ce sont généralement les sols les plus profonds du BV car ils se différencient sur des matériaux colluvionnés de comblement de vallée (différentes phases au Quaternaire dont il reste des surfaces parfois visibles). Ces colluvions ont ensuite été creusés par le réseau hydrographique, les cours d'eau de l'époque ont pu aussi abandonner leurs excès de charges sous la forme de terrasses alluviales dominant l'actuel cours de l'oued de quelque +5 à +7m. La pédogénèse s'effectue au dépens d'un matériau hétérogène verticalement et latéralement provenant du mélange de tout ce qui était en amont. On note cependant assez peu de lits de cailloux mais, par contre, on y trouve de nombreux sols enterrés.

Texture argilo-limoneuse à argileuse (mode = 50% - 20% - 30%), la terre meuble est surtout fournie par les bancs marneux de l'amont. Couleur brun jaunâtre foncé. Structure fine bien développée en hiver mais fragile (tassement). MO variable de 1,0 à 1,7. Leurs surfaces forment plus souvent des pellicules structurales que des pellicules de battance après effondrement des labours.

Profondeur: sols très profonds, > 100cm avec difficulté de distinguer les horizons d'altération C de ce qui est du matériau originel meuble R.

Economie de l'eau : bonne pour ce qui concerne l'importance du volume exploré par les racines, infiltrabilité souvent bonne, par contre, remontée capillaire problématique dans des matériaux à granulométrie verticalement hétérogène.

Occupation : Cultures (céréales, maraîchage et fruitiers si irrigation)

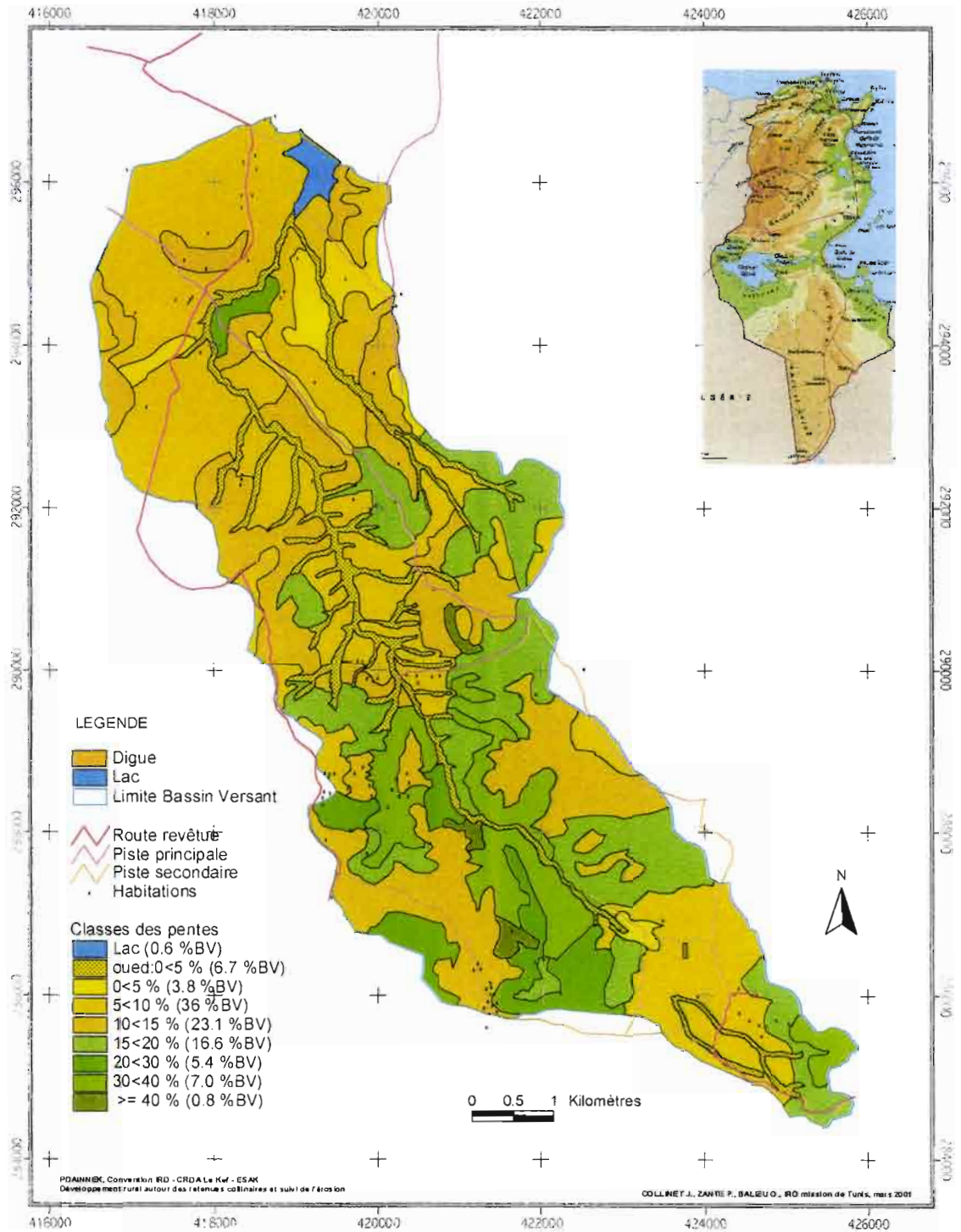
11 - Alluvions et affleurements rocheux nus des oueds (pour mémoire, non cartographiables)

Ce sont les matériaux meubles alluviaux actuels R, ils sont modifiés à chaque crue. Ce sont aussi des dalles nues de calcaire ou de marnes non altérées.

--O--

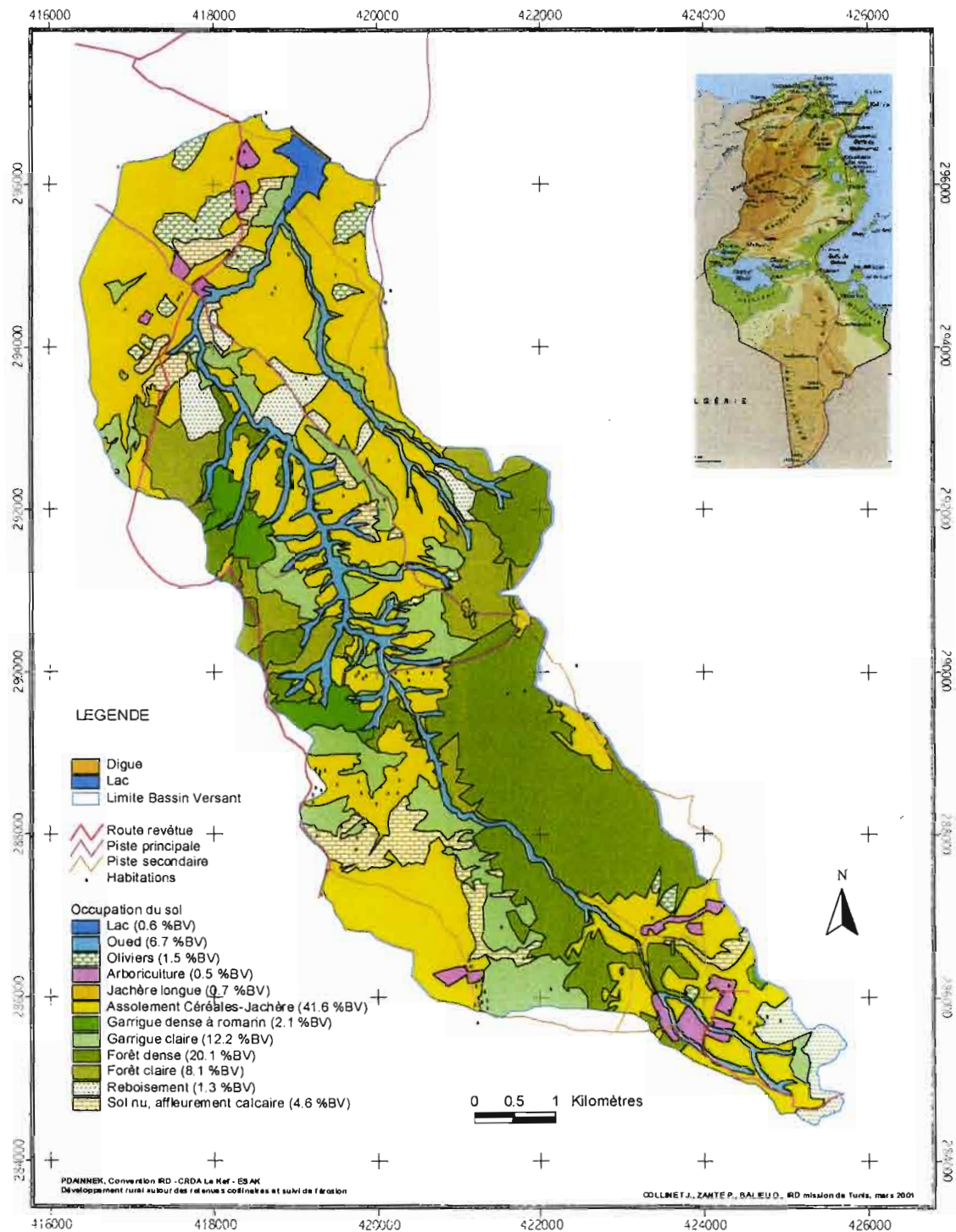
ANNEXE 9 : Carte des pentes

BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR Carte des classes de pentes



ANNEXE 10 : Carte d'occupation des sols

BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR Carte de l'occupation du sol



ANNEXE 11 : Carte des aménagements de CES

BASSIN VERSANT OUED ZANFOUR

Carte des aménagements de CES

